



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**ANÁLISIS DE PERFILES DE CARGA ENERGÉTICOS
DE UN CICLO RANKINE ORGÁNICO A PARTIR DE
RECURSO GEOTÉRMICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

ELISABET CALDERÓN MALDONADO

ASESOR:

DR. RODOLFO ALBERTO HERRERA TOLEDO



CIUDAD DE MÉXICO

DICIEMBRE 2021



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.

*A LA MEMORIA DE MI PADRE;
TOMAS CALDERÓN CARALAMPIO
(1969-2021)*

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM quien me abrió las puertas a una educación superior en esta máxima casa de estudios, gracias infinitas.

A mi padre, Tomas, a quien siempre recordaré con tanto amor, quien siempre me cuidó, apoyó y me enseñó a superar los obstáculos que se encuentren en la vida, quien a pesar de su arduo trabajo y grande cansancio siempre me apoyo incondicionalmente, y aún en sus peores batallas me enseñó a ser paciente y sobre todo me ha enseñado lo que es la verdadera fuerza y el valor del trabajo.

A mi madre Pilar, quien siempre vela por el bienestar de todos, que no importando que tan temprano o tarde uno llegue o salga de casa, siempre está demostrando su amor y cariño que nos guarda, dando una palabra de apoyo en el momento adecuado, siempre dando lo mejor de ella para que de lo mejor de mí.

A mis hermanos Daniel y Eva, quienes siempre vi como un ejemplo a seguir, y al mismo tiempo me hicieron trazarme metas y esforzarme aún más para lograr alcanzarlos, quienes me ayudaron desde la infancia e incluso aún en la adultez, con quienes he pasado los momentos más felices de mi vida y también los más abruptos.

A mi asesor de tesis, al Dr. Rodolfo Herrera Toledo, a quien le doy un amplio agradecimiento y reconocimiento, por todo su tiempo dado y dedicación, quien siempre me dio su completa paciencia a pesar de mis inconstancias, pero sobre todo por todo el conocimiento que me transmitió y todo lo que me enseñó durante la elaboración de este trabajo, sin usted este trabajo nunca se habría logrado.

A mis sinodales al Dr. Mariano, Dr. Dirzo, I.Q. Dominga e I.Q Aldo, quienes dedicaron su tiempo en la elaboración de este trabajo.

A mis amigos y compañeros Sonia, Giovanna, Carlos, Jaime, Fernando, Eduardo, Omar, Mauricio y Ernesto, quienes hicieron de mi vida universitaria una grata experiencia, con quienes estude, reí, y tal vez llore, pero siempre estuvieron en todo momento apoyándome cuando lo necesité.

Sin olvidarme de quienes conocí antes de ingresar a la universidad y también me apoyaron en este tiempo y aconsejaron cuando lo necesite me refiero a Betzabé, Armando, Mony e Irais, amigos que siempre tengo en mente y que aprecio mucho por sus consejos y ayuda.

No sin antes mencionar a alguien muy importante, gracias a Naasón Joaquín García, quien me ha enseñado a ser alguien mejor para la sociedad, que sea alguien que aporte al bienestar de la comunidad y siempre a la superación, sobrepasando los obstáculos que existan, siempre firme y adelante.

A TODOS USTEDES GRACIAS.

Resumen	1
Introducción	2
Capítulo 1.	
Ciclo Rankine orgánico	4
1.1. Fluido de trabajo.....	5
1.2. Equipos de trabajo.....	9
Compresión del fluido.....	10
Evaporador y condensador	11
Proceso de expansión	12
Regeneración	13
Capítulo 2.	
Fuente energética: Geotermia	14
2.1. Panorama energético	14
2.1.1. Panorama mundial	15
2.1.2. Panorama nacional	16
2.2. Geotermia	19
Explotación del recurso geotérmico	20
Procesos utilizados	21
2.3. Energía geotérmica en México.....	23
Capacidad instalada y generación	24
2.4. Características energéticas y químicas	27
2.5. Comportamiento productivo.....	29
Generación de agua caliente	30
Declive.....	31
Estimulación.....	31
Capítulo 3.	
Análisis del ORC con fuente geotérmica	34
3.1. Selección del fluido de trabajo.....	34
3.2. Cálculos del ciclo de potencia.....	37
Cálculo del ORC simple.....	37
Consumo energético de los servicios auxiliares.....	42
Capacidad instalada y producción energética.....	44
Cálculo del ORC regenerativo.....	47
Consumo energético de los servicios auxiliares.....	52
Capacidad instalada y producción energética.....	52

3.3. Perfiles de carga.....	57
Estimulación.....	59
Capítulo 4.	
Análisis económico.....	62
4.1. Determinación de costos	63
4.2. Análisis de costos.....	68
4.3. Análisis económico	70
Conclusiones	74
Referencias.....	76
Anexos.....	81

TABLA DE NOMENCLATURA

Siglas

ORC	Ciclo Rankine orgánico
ORCR	Ciclo Rankine orgánico regenerativo
ODP	Potencial de destrucción de capa de ozono
GWP	Potencial de calentamiento global
HCFC	Hidroclorofluorocarbonos
HFC	Hidroclorofluorocarbonos
CFC	Clorofluorocarbonos
EES	Engineering Equation Solve
VAN	Valor actual neto
TIR	Tasa interna de retorno
ROI	Tiempo de retorno de inversión

Subíndices

b	Ebullición
c	Condición critica
i	Ideal
AG	Agua geotérmica
GV	Generador de vapor
TV	Turbina
TE	Torre de enfriamiento
BPE	Bomba del pozo a la superficie
BAT	Bomba de TE-01 a CO-01
nR245fa	Corriente n del fluido orgánico
BAORC	Bomba del Ciclo Rankine orgánico
OCRB	Bomba del ciclo Rankine orgánico

Propiedades

T	Temperatura [°C] [K]
P	Presión [bar] [kPa]
\dot{m}	Flujo masico [kg/s]
C _p	Capacidad calorífica [kJ/kg K]
\dot{E}	Energía por unidad de tiempo (Potencia) [kJ/s] o [KW]
s	Entropía específica [kJ/kg K]
h	Entalpía específica [kJ/kg]
\dot{W}	Tasa de trabajo [kJ/s] o [kW]

Símbolos griegos

ΔT	Diferencia de temperatura [°C]
η	Eficiencia [%]

PROLOGO

El uso de energía geotérmica para generación de energía eléctrica al encontrarse mayormente enfocado a aquellas fuentes de alto gradiente térmico, se optó por el análisis de aquellas fuentes que son despreciadas por su bajo gradiente térmico y que pueden ser explotadas por medio de un ciclo de potencia como lo es el ciclo Rankine orgánico.

Siendo el objetivo general el evaluar la diferencia entre la generación de energía con decaimiento térmico, y la generación de energía en condiciones constantes, de una fuente geotérmica de baja entalpia, con un sistema de ciclo Rankine orgánico (ORC). Y como objetivos particulares:

- Conocer el panorama energético mundial y nacional
- Calcular las variaciones de eficiencia en el ORC en el tiempo de vida del proyecto
- Suponer una estimulación y analizar su aumento energético y el beneficio que conlleva a la generación de energía

Obteniendo así la diferencia que existe entre la consideración de estado dinámico del pozo de producción y aquel en estado estacionario, llevándose a cabo el análisis económico se denota un mejor panorama en ciertos indicadores en el supuesto donde la generación energética permanece constante, que aquel en que se toma en cuenta el decaimiento del pozo.

A pesar de tener mejores cifras en los indicadores, en ninguno de los casos es viable económicamente la generación energética por medio del ORC con una fuente de bajo gradiente térmico.

INTRODUCCIÓN

En la vida cotidiana el insumo más utilizado por la población es la energía eléctrica, la cual se ve involucrada en la vida diaria, convirtiéndose en parte indispensable para llevar a cabo gran cantidad de actividades, desde básicas personales hasta las industriales, de ahí el porque es necesaria la generación de energía eléctrica. Sin embargo, esta por muchos años se ha venido generando por medio de recursos fósiles, a los cuales se le ha atribuido como emisores de gases de efecto invernadero.

En las últimas décadas se ha ido optando por la generación energética por medio de recursos denominados renovables, que, si bien estos también llegan a ser emisores de contaminantes, no son a la misma escala comparados con los recursos fósiles. Dentro de los recursos renovables encontramos varios, como lo son la solar, eólica y termoeléctricas, las cuales son las más conocidas dentro de la población en general.

Por ello es importante hondar en los demás recursos renovables, y ver por medio de que procesos se pueden explotar estos, además de conocer la viabilidad económica. Por ello en el presente trabajo de tesis nos enfocaremos en la geotermia, la cual tiene gran potencial debido a que no se requiere de una temporada en específico para poder hacer uso de ella, además de que el calor interno de la tierra se considera abundante.

A pesar de que ya se hace uso de la energía geotérmica, dentro de esta se llega a despreciar recurso geotérmico que tiene bajo nivel energético desde el pozo de producción, el cual puede ser utilizado en ciclos de potencia específicos, como lo es el Ciclo Rankine orgánico, el cual puede operar a temperaturas más bajas comparado al Ciclo Rankine.

Aunado a la generación energética con recurso geotérmico de bajo nivel energético por medio del Ciclo Rankine orgánico, se encuentra el comportamiento de producción de este recurso. Por ello no solo se requiere saber sobre el ORC sino, el ver cómo ese comportamiento afecta a la generación que tendrá este.

Derivando así en contemplar la producción del pozo geotérmico en casos reales de producción (estado dinámico) y un caso ideal (estado estacionario). En donde a partir de esa observación se podrá contemplar cómo afecta en un análisis económico ese comportamiento real e ideal, y además ver si es factible económicamente o no, lo cual dentro del sector energético y para cualquier sector es importante que sea viable económicamente para que se lleva a cabo un proyecto.

Si bien, existen temas sobre explotación del recurso geotérmico con ORC, se encuentran mayormente en la recuperación de la salmuera geotérmica (bajo nivel energético) que ha sido despreciada de plantas que operan con recurso de alta entalpía, sin contar el decaimiento de producción que tiene el recurso geotérmico. Específicamente nos enfocamos desde la parte de un pozo de baja entalpía y la producción durante el tiempo de vida de este contemplando el decaimiento productivo, hasta como afecta en la generación de energía eléctrica los dos factores anteriormente mencionados.

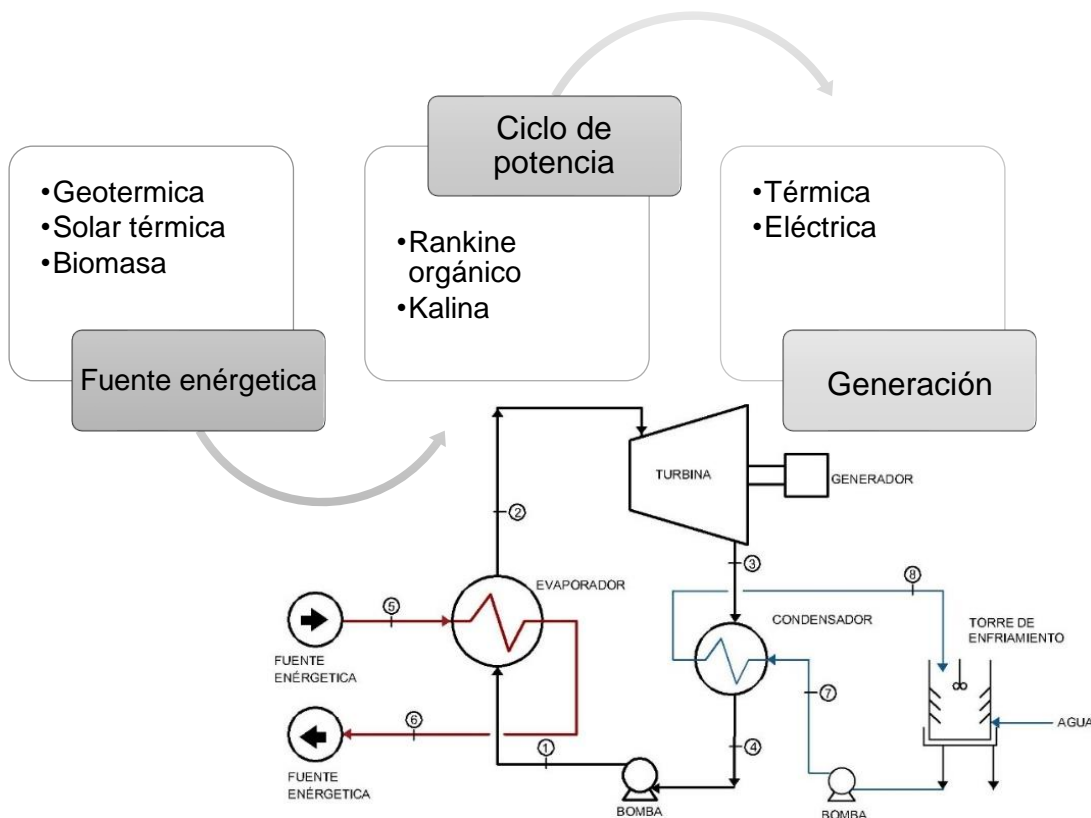
CAPÍTULO 1.

CICLO RANKINE ORGÁNICO

La producción de energía eléctrica se ha llevado a cabo por diferentes tecnologías, entre los cuales se encuentran los ciclos de potencia (actualmente existen sistemas de celdas de combustible, generación fotovoltaica entre otras), en los cuales se han realizado modificaciones para operarlos utilizando recursos renovables, es decir anteriormente estos sistemas solo se abastecían de recursos no renovables con la quema de combustibles fósiles.

Entre las modificaciones que se han ideado en los ciclos de potencia, se encuentra la utilización de recursos renovables con bajo nivel energético, aprovechando así aquellos que de acuerdo con tecnología de hace décadas no se considerarían adecuados para su explotación energética.

Figura 1. Desarrollo de generación eléctrica y térmica



Elaboración propia, con notas de curso de cogeneración del Profesor Rodolfo Herrera

A partir del uso de un ciclo de potencia abastecido con una fuente energética, se obtiene la generación eléctrica y térmica.

Existen diversos recursos renovables para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, aquellos útiles para ciclos de potencia que trabajan con recurso de bajo nivel energético lo son el ciclo Rankine orgánico y Kalina, como el que puede observarse en la figura 1, son generalmente los recursos de Geotermia, Solar Térmica y Biomasa los utilizados en estos ciclos de potencia.

El Ciclo Rankine orgánico (ORC, por sus siglas en inglés Organic Rankine Cycle) muestra que tiene mayor recuperación de calor y requiere de menor mantenimiento comparado al ciclo Kalina en ciertos casos. (Nemati & Hossein, 2017)

El principio operacional del ORC es el mismo que el ciclo Rankine tradicional. Consiste en la transferencia de energía por medio de un intercambiador de calor a un ciclo que acciona una turbina y consecuentemente al generador eléctrico.

La diferencia entre el tradicional Ciclo Rankine y el ORC se ubica en la sustitución de agua por un fluido orgánico. Lo que deriva en el aprovechamiento de un fluido primario con recursos de baja/media temperatura o nivel energético para la producción de vapor, así culminando con la generación de energía eléctrica y térmica.

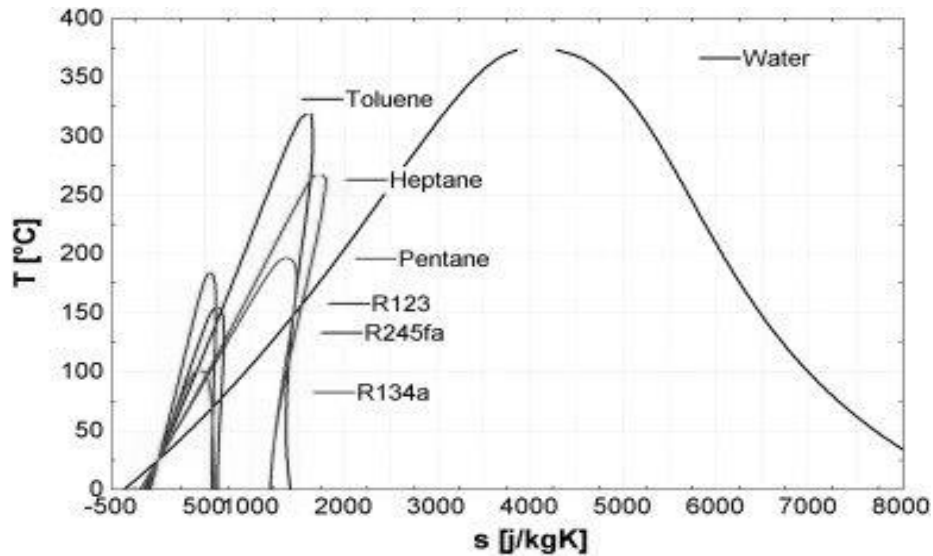
Describiéndose de manera más amplia el Ciclo Rankine; una bomba presuriza el fluido orgánico introduciéndolo a una caldera en el cual se transforma en vapor, el cual se expande en una turbina que se encuentra conectada a un generador. Finalmente, el vapor que sale de la turbina se condensa y es recirculado por la bomba para comenzar el ciclo nuevamente. (Chejne Janna, 2015)

1.1. FLUIDO DE TRABAJO

Como se mencionó anteriormente, la diferencia entre el ciclo convencional y el orgánico, radica en la sustitución de agua por un fluido orgánico.

Las propiedades termodinámicas de los fluidos orgánicos comparados con el agua hacen al ciclo funcional a pesar de no contar con una fuente energética de alto gradiente térmico.

Figura 2. Comparación del diagrama T-s entre agua y fluidos orgánicos.



Obtenido de (Dickes, 2013).

De acuerdo con el diagrama T-s de la figura 2, para poder obtener vapor de agua se requeriría de una mayor transferencia de energía de parte de la fuente primaria que en el caso de los fluidos orgánicos; lo que quiere decir, mientras que en un fluido orgánico nos encontramos en la región de vapor saturado, en el agua nos encontraríamos en el área líquido+vapor con una tendencia en la calidad cercana al 0 a pesar de tener la misma cantidad de energía de la fuente térmica.

El fluido orgánico del ciclo tiene el papel más importante dentro del proceso, ya que de este dependerá las condiciones de operación del ciclo y consecuentemente del valor de la eficiencia. La selección adecuada del fluido brindará la posibilidad de contar con un sistema ORC más eficiente y estable. (Wang & Hongguang, 2015)

Dado esto, el fluido de trabajo debe contar con propiedades termodinámicas adecuadas dados los requerimientos térmicos del ORC, los cuales serían a las más bajas temperaturas y presiones posibles, además de satisfacer múltiples criterios tales como; económico, no tóxico, no inflamable, amigable con el medio ambiente,

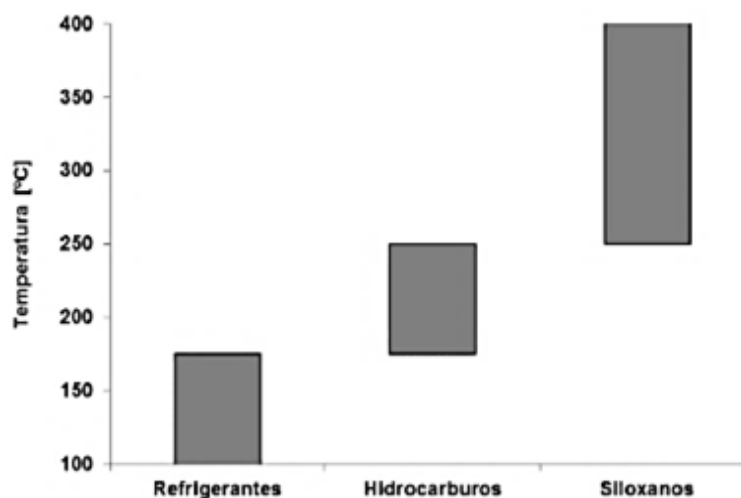
permitir una alta utilización de la disponibilidad energética de la fuente de calor, etc. (Chejne Janna, 2015)

La selección del fluido depende principalmente de:

- Temperatura de la fuente térmica.
- Propiedades termodinámicas del fluido.
- Ser factible económicamente.
- Bajo nivel de Potencial de destrucción de la capa de ozono (Ozone Depletion Potential), ODP por sus siglas en inglés. Se define y limita con el protocolo de Montreal, el cual evita la destrucción de la capa de ozono. (ONU, 2016)
- Bajo nivel de Potencial de calentamiento global (Global Warming Potential) GWP por sus siglas en inglés. Con el protocolo de Kioto, evita la emisión de gases que provocan el efecto invernadero. (Ortúzar, 2016)

Conforme a lo anterior, las propiedades termodinámicas de los fluidos de trabajo en los ciclos de potencia se tienen que considerar para una adecuada selección, dentro de los fluidos orgánicos se encuentran 3 tipos; refrigerantes, hidrocarburos y siloxanos. Cada uno de ellos siendo factible dependiendo la temperatura de la fuente energética.

Figura 3. Clasificación de fluidos de trabajo en sistemas ORC, de acuerdo con la temperatura de la fuente de calor.



Obtenido de (Chejne Janna, 2015).

Teniendo en cuenta que el presente trabajo se enfoca en fuentes energéticas de bajo nivel energético o baja entalpía, el fluido adecuado son los refrigerantes, por sus propiedades de entalpía de vaporización a bajas temperaturas y presiones.

Se puede demostrar con la Figura 2, que los hidrocarburos como son el tolueno, heptano y pentano tienen una campana de saturación más grande, comparada a los refrigerantes R123, R245fa y R134a, demostrando que requieren de un mayor suministro energético de una fuente térmica para evaporarse.

Los refrigerantes, se caracterizan por su alto peso molecular, bajo punto de ebullición y la absorción de calor a menores temperaturas comparados con los hidrocarburos y siloxanos.

Dentro de la clasificación de los refrigerantes, se encuentra la clasificación por la composición química, la cual es parte fundamental para la adecuada selección del fluido como veremos a continuación.

Clorofluorocarbonos

Se componen de compuestos de cloro, flúor y carbono. No son inflamables ni explosivos, sin embargo, tienen un rango alto en el potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP), lo que hace nulo su uso, por medio del protocolo de Montreal.

Hidroclorofluorocarbonos

Son refrigerantes de alta seguridad, no son inflamables ni explosivos. Su uso comenzó para remplazar a los CFC. El potencial de agotamiento de la capa de ozono es menor a los CFC, pero a pesar de esto, se encuentra en proceso la eliminación de su uso.

Hidrofluorocarbonos

Se han creado para sustituir los CFC e HCFC. No contienen cloro y, por lo tanto, no representaban peligro para la capa de ozono, sin embargo, la presencia de flúor en su composición provoca que al ser emitidos contribuyan al calentamiento global (GWP), sus valores son elevados, lo que implica una influencia elevada en el efecto

invernadero, pero debido su nulo ODP, son los ideales para utilizar. (Wen Tien, 2005)

Podemos observar en la Tabla 1 que los índices que presentan los refrigerantes (CFC, HCFC e HFC) se dan dentro de una composición de rangos promedio.

Tabla 1. Características promedio de los refrigerantes orgánicos.

Compuesto	ODP	GWP	Tiempo de vida en la atm (años)
Clorofluorocarbonos	0.6-1	4750-14400	45-1700
Hidroclofluorocarbonos	0.02-0.11	77-2310	1.3-17.9
Hidrofluorocarbonos	-	124-14800	1.4-270

Elaboración propia con datos de (HVC&A, 2014).

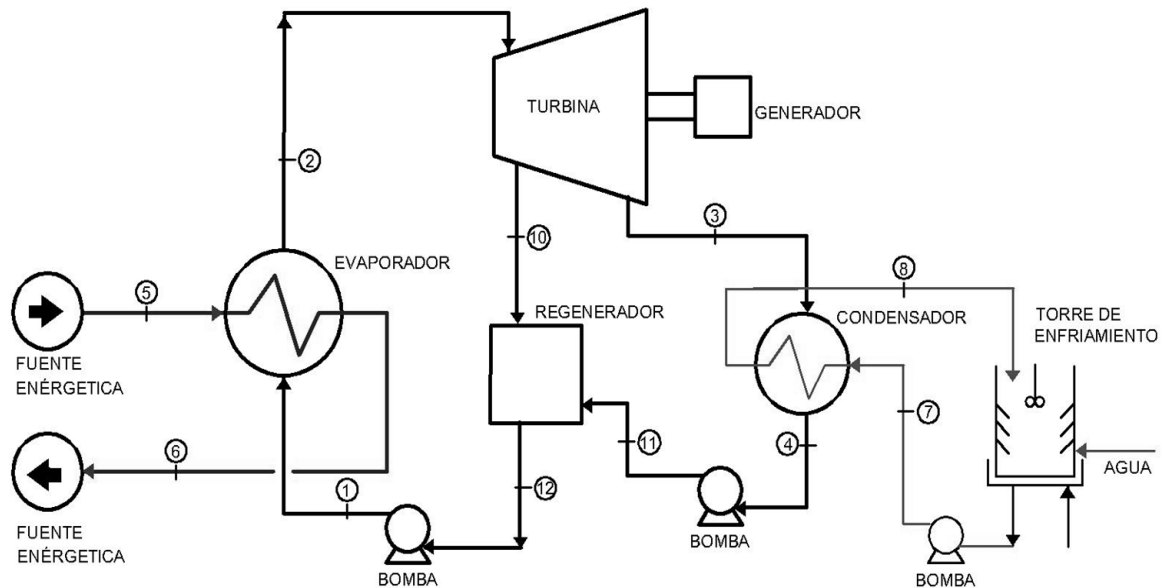
Los índices que presenta el ODP, va de 0 a 1 y entre más cercano sea a 0 significa que es menor el daño a la capa de ozono. Mientras que el GWP se basa en equivalencia a 1 kg de CO₂, que significa que 1 kg de CFC es equivalente 4,750-14,400 kg de CO₂ y así para cada compuesto que tenga esta característica.

1.2. EQUIPOS DE TRABAJO

El Ciclo Rankine orgánico, consta de cuatro equipos en los cuales circula el fluido de trabajo o fluido secundario, como se esquematiza en la figura 1.

Asimismo, el ciclo se puede configurar para aumentar la eficiencia y producción energética, para ello se recurre al recalentamiento o la regeneración. Los equipos de trabajo para el ORC y el Ciclo Rankine orgánico regenerativo (ORCR, por sus siglas en inglés Organic Rankine Cycle regenerative) constan de los mismos equipos como se observa en la siguiente imagen, a excepción del regenerador y una segunda bomba que interviene dentro del ciclo.

Figura 4. Esquema del ciclo Rankine orgánico regenerativo.



Elaboración propia

El principio operacional del ORCR es igual al ORC, exceptuando que una fracción de vapor proveniente de la turbina va hacia el regenerador, el cual precalentará el fluido orgánico sin que exista un cambio de fase, así teniendo una transferencia de calor mejor en el evaporador, ya que el ΔT requerido para acondicionar el fluido a la salida del evaporador disminuye entre el fluido orgánico y la fuente energética, por ende, se tiene mayor generación térmica y eléctrica, comparado con ORC base.

Compresión del fluido

Un equipo de bombeo es un transformador de energía. Recibe energía mecánica, que puede proceder de un motor eléctrico, térmico, etc., y la convierte en energía que un fluido adquiere en forma de presión, de posición o de velocidad. El objetivo de una bomba es aumentar la energía del fluido, principalmente la energía de presión interna. (Viejo Zabicaray, 2000)

Para llevarse a cabo el objetivo de producción energética por medio de recursos de baja entalpía se requieren de dos tipos de bombas, las cuales son; la del Ciclo Rankine orgánico y la de suministro del fluido energético.

El tipo de equipo de compresión dentro del ORC requiere que mantenga al fluido orgánico en líquido saturado. Las presiones necesarias para que lleve a cabo su función son bajas en comparación con bombas especializadas para el aumento de presión que manejan presiones superiores a 120 bar, por ello se opta por las bombas centrífugas de tipo voluta.

Este tipo de bombas satisficieran los requerimientos dentro del ciclo, ya que lo que se requiere es únicamente el aumento de presión del fluido de trabajo orgánico para que se conserve dentro del rango de saturación del sistema.

Para la obtención del fluido de la fuente energética se requiere de la compresión de este para hacerlo llegar a la superficie, por ello el tipo de bomba para la extracción de fluidos provenientes de pozos, se encuentran los sistemas de bombas verticales tipo turbina, las cuales se consideran dentro de la clasificación de bombas centrífugas. (Pacheco Ibarra , 2019)

Las cuales cuentan con las características para su utilización, de las cuales resalta la capacidad de operar a altas temperaturas hasta 232°C, resistencia a fluidos corrosivos y una carga dinámica total de hasta 2,112 metros.

Evaporador y Condensador

Son sistemas en los que la transmisión de calor se efectúa provocando un cambio de fase (evaporación/condensación) de forma que la variación de entalpía de dicho cambio es la que hace variar la temperatura del sistema. Los cuales tiene uso en centrales eléctricas de vapor, plantas de procesamiento químico, sistemas de calefacción y aire acondicionado de edificios, etc. (Bahman, 2017)

El tipo de intercambiador de calor que se utiliza es el que se denomina de tubos y coraza. El cual consiste en un conjunto de tubos en un contenedor llamado carcasa. El flujo de fluido dentro de los tubos se denomina comúnmente flujo interno y aquel que fluye en el interior del contenedor como fluido de carcasa o fluido externo.

En los extremos de los tubos, el fluido interno es separado del fluido externo de la carcasa por las placas del tubo. Los tubos se sujetan o se sueldan a una placa para

proporcionar un sello adecuado. Debido a los costos de los materiales, los tubos del intercambiador de calor se pueden fabricar para soportar presiones más altas que la carcasa del intercambiador con un costo más bajo. (Jaramillo, 2007)

Se utilizan para fluidos de altas presiones y flujos máxicos grandes. Las características que se tienen para su operabilidad es que por los tubos va el fluido que maneja mayor presión, mayor suciedad y el más corrosivo, mientras que por el lado de la coraza va el fluido menos corrosivo y el que tiene menor pérdida de presión.

Si se recurre a un intercambiador de tubos y carcasa para condensar se requiere que el fluido a condensar fluya por el lado de la carcasa y al fluido que se le transfiere el calor tiene que ir del lado de los tubos

Dentro del ORC, en el evaporador se hace circular el fluido de mayor temperatura, en nuestro caso el agua geotérmica produce la evaporación del fluido orgánico, mientras que en el condensador los fluidos son de agua de enfriamiento y fluido orgánico. En ambos se actúa por el principio de la segunda ley de la termodinámica, el cual enuncia la transferencia el calor del fluido de mayor temperatura al fluido de menor.

Para el evaporador se tienen que tomar en cuenta:

- Las altas presiones
- Las incrustaciones generadas por el fluido energético
- Los grandes caudales que transitara por el

Para el condensador se tiene que tomar en cuenta:

- El ΔT entre el refrigerante y el agua de enfriamiento
- El caudal de agua de enfriamiento
- Tiempo de residencia para condensar el fluido orgánico

Proceso de expansión

La turbina se puede definir como el equipo principal del ciclo, ya que este es el equipo que conectado a un generador produce la energía eléctrica.

El vapor saturado que procede del evaporador va hacia la turbina, se expande el vapor isoentrópicamente que, conectada a un generador, produce energía eléctrica. De manera simplificada ese es el funcionamiento de la turbina.

Las turbinas se clasifican por:

- Forma de aprovechamiento de la energía contenida en el flujo de vapor (reacción y acción)
- Número de etapas (multietapa y monoetapa)
- Dirección del flujo de vapor (axiales y radiales)
- Presión de salida del vapor (contrapresión, escape libre y condensación)

El tipo de turbina a utilizar dentro del ORC son adaptadas para la expansión de fluidos densos bajo presión, dentro de la clasificación que se da son turbinas axiales multietapa. (Enertime)

Regeneración

También denominado calentador de fluido de alimentación o de contacto directo es básicamente una cámara de mezclado en la que una fracción de vapor extraído de la turbina se mezcla con el fluido de alimentación que sale de la bomba. Idealmente, la mezcla sale del calentador como líquido saturado a la presión del calentador. (A. Cengel & A. Boles , 2011)

Por medio de este calentador la eficiencia, capacidad instalada y generación aumentan debido al precalentamiento que le dará al fluido de trabajo antes de entrar al generador de vapor.

Con la comprensión que se tiene del Ciclo Rankine orgánico (principio operacional, fluidos de trabajo, configuraciones y los equipos de trabajo) en los capítulos posteriores se desarrollará la selección específica del fluido de trabajo, a partir de ello se establecerán las propiedades del Ciclo. Por medio del software EES (engineering equation solve) se llevará a cabo el modelado del ORC y ORCR para determinar cual de los dos resulta más beneficioso, esto quiere decir cual va a dar mayor capacidad instalada, generación energética y eficiencia.

CAPÍTULO 2.

FUENTE ENERGÉTICA: GEOTERMIA

La energía eléctrica se produce por medio de diferentes procesos como se menciona en el capítulo anterior, y mediante tres tipos de recursos:

- No renovables: quema de combustibles fósiles los cuales comprende al carbón, gas natural y petróleo.
- Renovables: corresponde a la generación por medio de sistemas hidroeléctricos, geotérmicos, eólicos, bagazo de caña, fotovoltaicos y biogás.
- Otras limpias: nuclear, cogeneración eficiente, frenos regenerativos y licor negro.

Cada uno de los recursos son explotados en diferente proporción, por ello es necesario un enfoque en la producción por medio de aquellos recursos que no afectan o que tienen una baja producción de emisiones contaminantes para satisfacer la demanda energética, que es una de las prioridades de la última década.

2.1. PANORAMA ENERGÉTICO

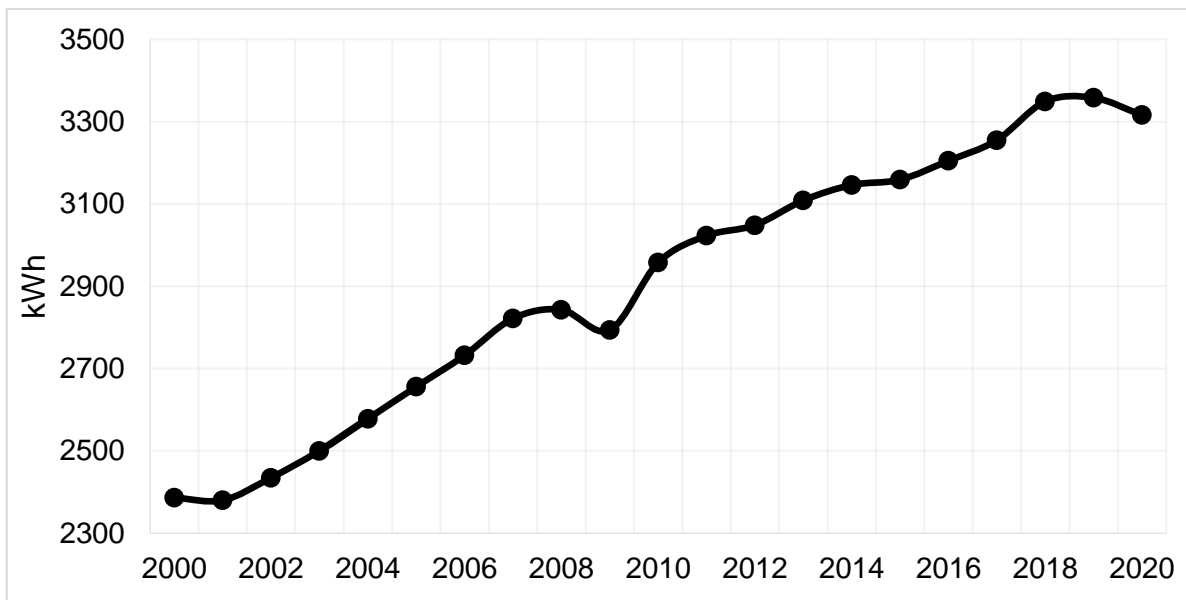
En el panorama se tiene que conocer el consumo, capacidad instalada y generación de energía eléctrica a partir de los recursos que son usados como fuentes energéticas. Ya que estos 3 elementos se encuentran en constante cambio.

El consumo anual de energía eléctrica tiende a aumentar proporcionalmente al crecimiento poblacional anual, sin embargo, se llegan a tener disminuciones en el consumo, estas se atribuyen a los cambios de hábitos, la percepción que se tiene del clima, mejora tecnológica, por mencionar algunos, esto quiere decir que la disminución en el consumo corresponde casi exclusivamente a la población, que son condiciones externas al sector energético (capacidad instalada y generación eléctrica).

2.1.1. Panorama mundial

Como podemos observar en la figura 5, a nivel mundial el consumo se ha incrementado históricamente a pesar de tener disminución en 2009, tiene un aumento constante en los años posteriores igual que en años anteriores a la disminución. Lo que demuestra que se presentan eventos ocasionales donde se tiene una disminución en el consumo, pero teniendo usualmente como tendencia el crecimiento anual en el consumo de energía eléctrica.

Figura 5. Consumo de energía eléctrica per cápita mundial kWh 2000-2020.



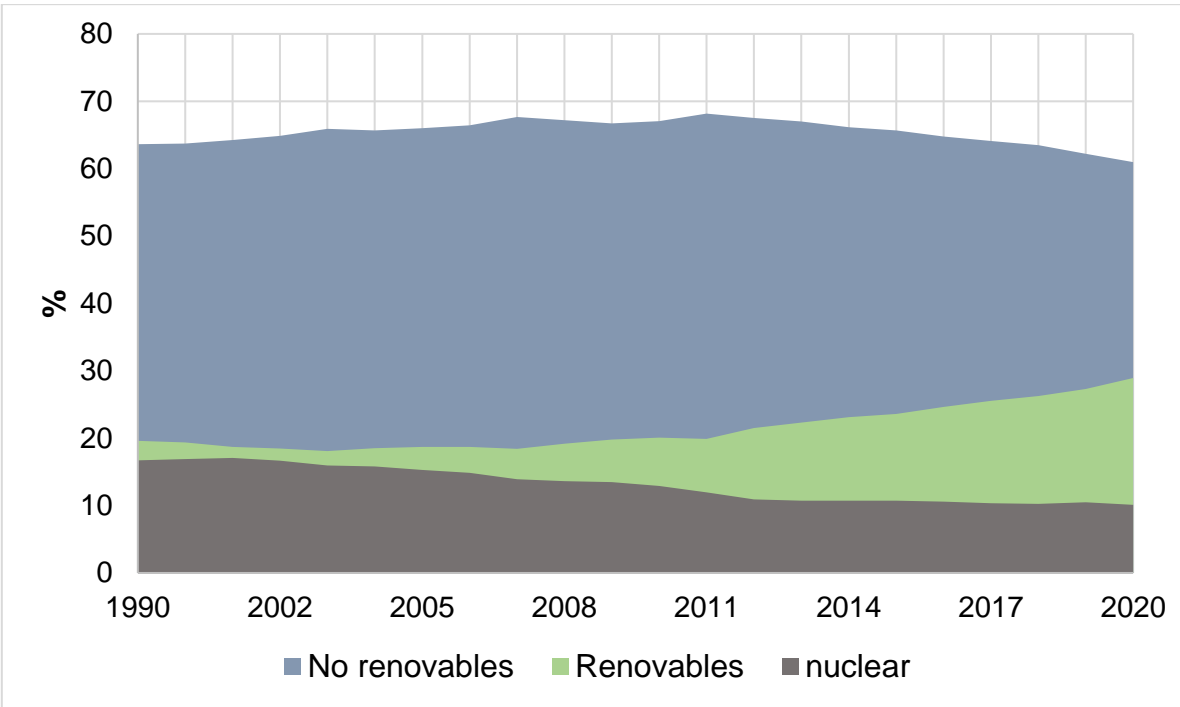
Obtenido de (OUR WORLD IN DATA, 2021)

Para ello, la producción de energía eléctrica tiene que corresponder a la demanda que existe de esta, para satisfacer las necesidades tanto de la población como de la industria. Esto quiere decir que debe haber un aumento anual de la capacidad instalada, para que haya un aumento en la producción y por lo tanto el crecimiento económico de un país.

La producción de energía eléctrica por medio de los recursos existentes se encuentra en un estado dinámico, en el que se explotan más ciertos recursos que otros, esta producción por recursos renovables ha ido en aumento del 19% a 28%

en el periodo de 1990 a 2020, la nuclear ha tenido un descenso de participación pasando del 16.9% en el 2000 a 10.12% en 2020, mientras que por quema de combustibles fósiles se conservan en el rango del 60%.

Figura 6. Porcentaje de generación de energía eléctrica mundial 2000-2020.



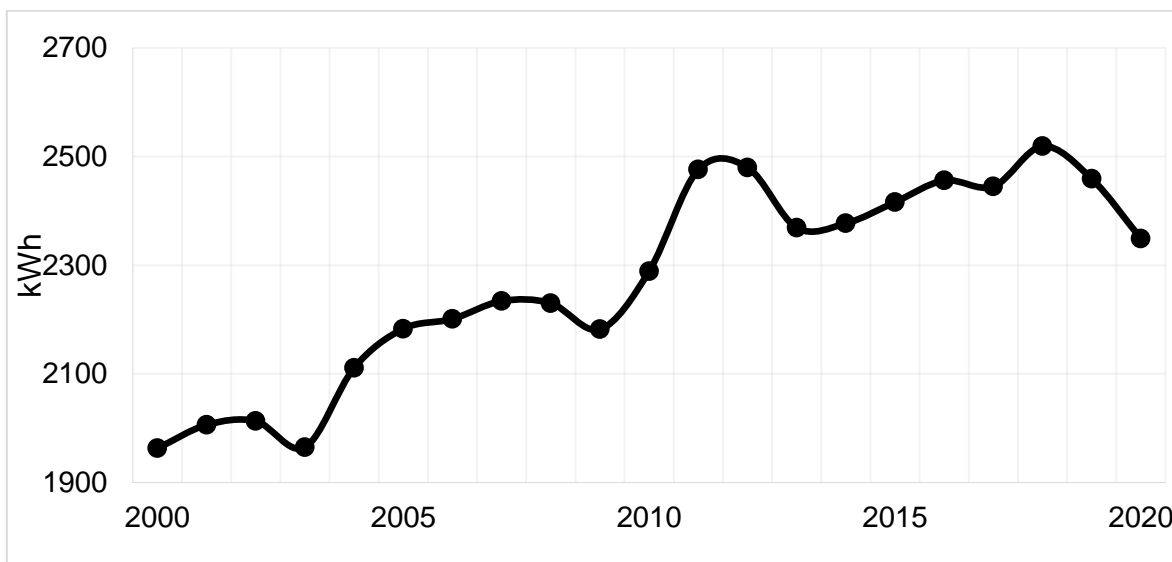
Elaboración propia con datos de Agencia Internacional de la Energía.

Se tiene un aumento en la generación por medio de recursos renovables, debido a que en las últimas décadas se ha mencionado en demasía la utilización de fuentes alternas. Al mismo tiempo se observa que la producción con recurso nuclear ha ido en descenso en los últimos años.

2.1.2. Panorama nacional

Nacionalmente se observa el mismo panorama que se nota internacionalmente, hay un crecimiento de consumo anual, siendo proporcional al aumento poblacional, sin embargo, igual al panorama mundial, en varios años se tiene una disminución en el consumo.

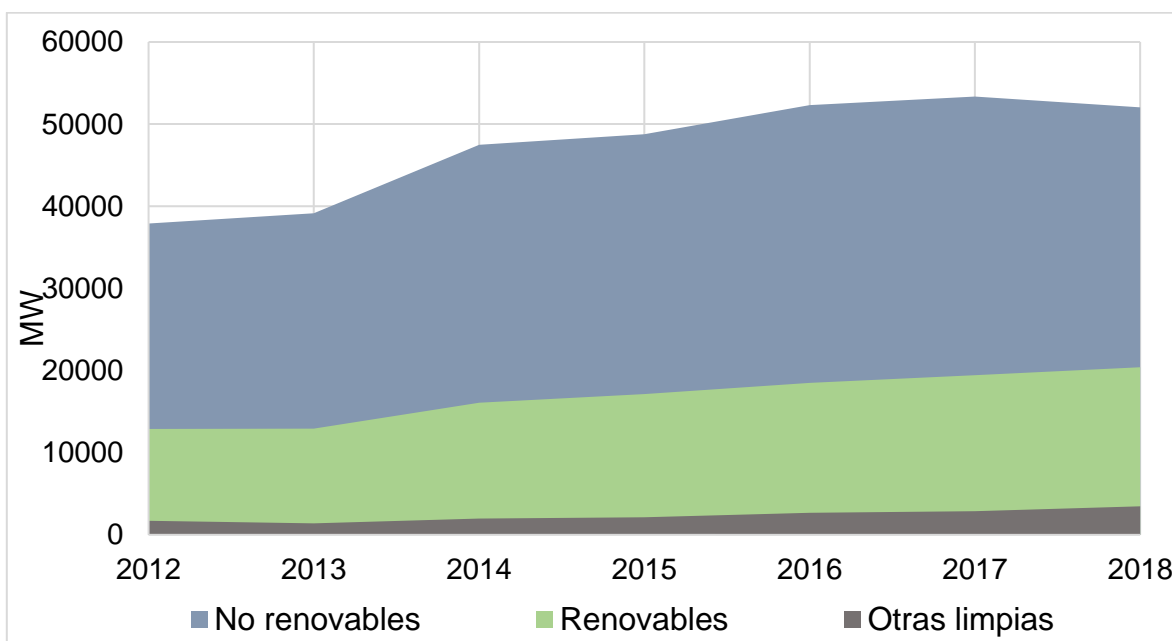
Figura 7. Consumo de energía eléctrica per cápita nacional (kWh) 2000-2020.



Elaboración propia con datos de (OUR WORLD IN DATA, 2021)

Anualmente hay un aumento en la capacidad instalada para la generación de energía eléctrica nacional, y el aumento se visualiza en los 3 tipos de recursos en la siguiente figura.

Figura 8. Capacidad instalada en MW nacionalmente 2012-2018.

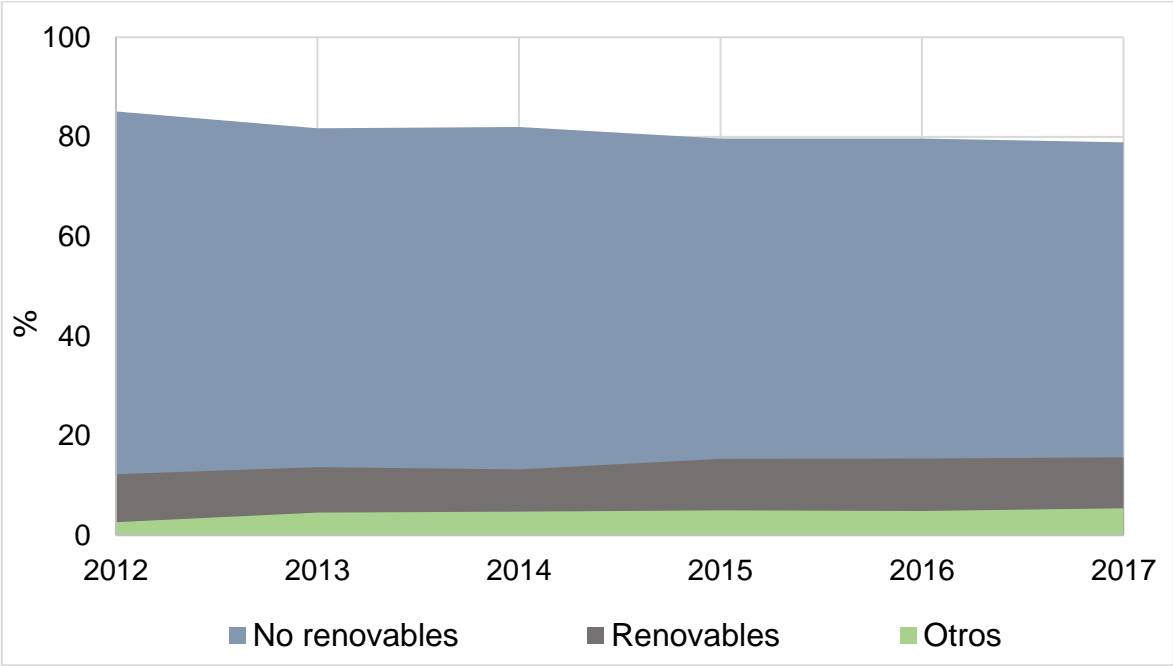


Elaboración propia con datos de (Beltrán Rodríguez , 2018)

A partir de la figura anterior observamos el crecimiento que se ha tenido en los últimos años de capacidad instalada para generación eléctrica por medio de recursos renovables a nivel nacional, visualizando la importancia de seguir en aumento la explotación de estos recursos, para dejar la dependencia que se tiene en los combustibles fósiles.

También cabe destacar el ligero crecimiento que se tiene en otras limpias, en la cual se encuentra la energía nuclear, si bien existe un aumento en capacidad, en el sector energético de México se encuentra estancado este tipo de plantas, ya que solamente se cuenta con los dos reactores localizados en Laguna Verde, Veracruz.

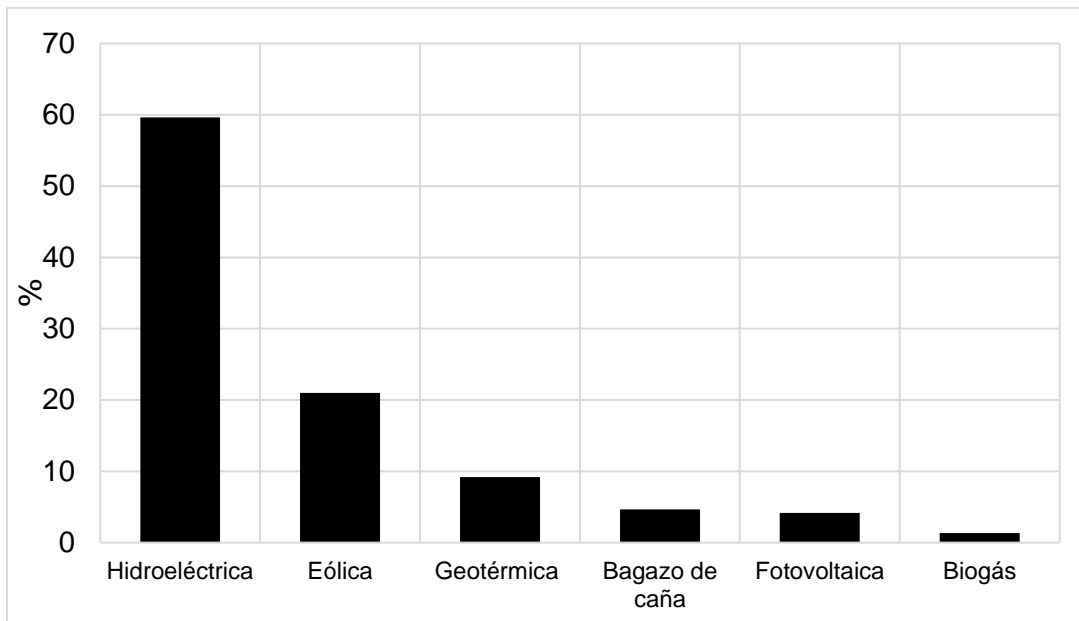
Figura 9. Porcentaje en la generación de energía eléctrica 2012-2017.



Elaboración propia con datos de con datos de (Beltrán Rodríguez, 2018).

Comparando los porcentajes generados mundialmente y el nacional, se observa que nacionalmente no se explotan los recursos renovables como a nivel mundial, ya que estos no pasan el 20% del total generado anualmente, y los que se siguen explotando en demasía son los fósiles. Es necesaria la revisión del porcentaje de producción de cada uno de los recursos renovables la cual puede verse en la figura 10 a continuación.

Figura 10. Porcentaje de generación de energía eléctrica por recursos renovables 2018*.



*Elaboración propia con datos de (Beltrán Rodríguez , 2018). *Primer semestre de 2018*

Al producirse más del 50% de energía eléctrica por medio de las hidroeléctricas, se podría ver la forma de tener una mayor explotación de los demás recursos, por ello en este trabajo nos hemos de enfocar en un recurso que, si bien ya es explotado nacionalmente, se mantiene por debajo del 10% en generación energética, nos referimos a la geotermia.

2.2. GEOTERMIA

Como se menciona en la figura 1, una de las fuentes energéticas que se utilizan para el ORC son los recursos geotérmicos, como lo mencionan diferentes autores; Bianchi & Branchini, Thurairaja, Ruiz Casanova & Soto Sánchez y Quolín entre otros. En cuyas investigaciones e informes reportan el uso de la geotermia como fluido primario en ciclos de potencia, específicamente del Rankine orgánico.

La geotermia se puede definir como la energía almacenada en forma de calor en el interior de la tierra. La explotación de un yacimiento geotérmico se lleva a cabo por

medio de pozos y debe efectuarse de manera tal que el volumen de agua caliente o vapor que se extrae no sea mayor que la recarga natural de agua que alimenta al acuífero. Solo bajo esta condición, el recurso energético puede ser considerado como una fuente de carácter renovable.

La energía geotérmica se considera una fuente de energía confiable debido a su independencia de las condiciones estacionales, climáticas y geográficas. Los pozos geotérmicos de baja temperatura presentan un enorme potencial de explotación, ya que el desarrollo de ciclos binarios y la mejora tecnológica en la perforación hacen de esta fuente de calor una solución competitiva para la distribución y autoconsumo de electricidad generada. (Bianchi & Branchini, 2018)

El flujo de calor desde el interior de la Tierra hacia los estratos superiores de la corteza produce cambios de temperatura a distintas profundidades, conocidos como gradientes geotérmicos. (Torres Rodriguez, Arellano Gómez , & Santoyo Gutierrez , 1993)

Estos pueden variar desde valores normales, alrededor de 30 hasta 200 grados centígrados por kilómetro, en los bordes de las placas tectónicas, donde el deslizamiento de éstas favorece el ascenso del magma. El flujo de calor suele calentar grandes extensiones de roca en la profundidad, donde se forman depósitos de fluidos calientes (denominados yacimientos hidrotermales) o sistemas de roca seca caliente. (Gallup, 2009)

Explotación del recurso geotérmico

El uso que se le ha dado al recurso geotérmico ha ido en aumento, desde el inicio de su explotación que se utilizaba exclusivamente para un uso recreativo, hasta la actualidad que su uso se amplía para fines energéticos. A partir de 1910 no ha cesado el uso de los recursos geotérmicos con fines de aprovechamiento energético, y conforme ha ido transcurriendo el tiempo se han ido ideando otros usos para aquellas fuentes de mediana y baja entalpía, por ende, ha ido incrementando la generación de energía eléctrica por este recurso.

Tabla 2. Orden cronológico de explotación geotérmica con fines energéticos mundialmente.

País y año	Aportación/Utilización
Italia. 1910-1940.	El vapor de baja presión se utiliza para calefacción.
Italia, Larderello. 1913.	Generación de electricidad a partir de vapor geotérmico, con 250kW.
Japón, Beppu. 1919-1924.	Perforación de los primeros pozos e instalación de planta de 1 kW para la producción de electricidad.
EUA, 1921.	Perforación de dos pozos e instalación de máquina de vapor para producción de electricidad.
Islandia. 1930.	Instalación de la primera red moderna de calefacción urbana.
EUA, Indianápolis. 1945.	Primera instalación con bomba de calor en una vivienda.
2000	La capacidad instalada de 8,000 MWe a nivel mundial.
2005	La capacidad aumenta a más de 9,000 MWe.
2007	A nivel mundial alcanzó la capacidad de 9,732 MW, (0.4% de generación eléctrica total).

Elaboración propia con datos de (Santoyo & Barragan Reyes, 2010).

Como se observa en la tabla 2, la explotación geotérmica tiene un crecimiento mundial, porque se percibe el aumento de explotación para producción energética, ya que su producción inicial en 1910 fue de 250 kW y en 2007 superó la cantidad de 9,000 MW. Siendo la mayoría de esta producción con recursos de alto gradiente térmico y con procesos más simples comparados con el ORC.

Procesos utilizados

Para la generación de energía eléctrica por medio de recursos geotérmicos, se explota el recurso por medio de procesos dependiendo el nivel energético, como podemos observar en la tabla 3.

Tabla 3. Procesos utilizados en relación con el recurso geotérmico.

Recurso geotérmico	Proceso y operaciones unitarias
Vapor seco / Vapor dominante Alta entalpía	Vapor seco: Turbina y condensador
Vapor húmedo / Líquido-vapor Alta y mediana entalpía	Flash simple: Separador, turbina y condensador Doble flash: Separador, turbina y condensador
Líquido Mediana y baja entalpía	Ciclo Rankine orgánico: Evaporador, turbina, condensador y bomba. Fluido de trabajo: orgánico Ciclo Kalina: Evaporador, turbina, condensador y bomba. Fluido de trabajo: mezcla de agua y amoníaco.

Elaboración propia

El proceso de vapor seco se puede definir como el más sencillo, ya que el vapor que asciende por el pozo pasa directamente a la turbina generando energía eléctrica, condensándose y trasladándose a un pozo de reinyección y así calificar como recurso renovable. Sin embargo, las condiciones de este tipo de yacimientos no son tan comunes.

Los yacimientos más comunes que se pueden encontrar y explotar son los de vapor húmedo, son aquellos que contienen vapor y líquido/salmuera geotérmica. El proceso que corresponde a este tipo de recurso emplea fluido geotérmico, con temperaturas superiores a 180°C y presiones relativamente elevadas.

La disminución de la presión del fluido provoca una evaporación súbita (“flasheo”) de parte de la fase líquida del fluido para formar vapor, el cual es separado del agua en separadores centrífugos. El vapor separado es conducido a turbinas para la producción de electricidad, mientras que la salmuera (agua geotérmica) es despreciada.

La diferencia entre el sistema simple y el de flasheo doble es que la salmuera es sometida a una segunda separación para un mejor aprovechamiento de su energía remanente. Este vapor secundario es empleado para incrementar la producción de electricidad a través de turbinas de baja presión. (Santoyo Gutiérrez & Torres Alvarado, 2010)

Figura 11. Esquema de una planta geotermoeléctrica de vapor seco



Obtenido de (Santoyo Gutiérrez & Torres Alvarado, 2010).

En la figura anterior vemos el proceso utilizado en vapor seco o también llamado flasheo simple, siendo el proceso más utilizado para la generación y también de los tipos de recurso geotérmico que más se explota por sus propiedades termodinámicas.

2.3. ENERGÍA GEOTÉRMICA EN MÉXICO

Los recursos geotérmicos ya eran explotados por varios países antes de que en México se optara por su uso. La generación geotermoeléctrica se inició en México en 1959, en la localidad de Pathé, Hidalgo.

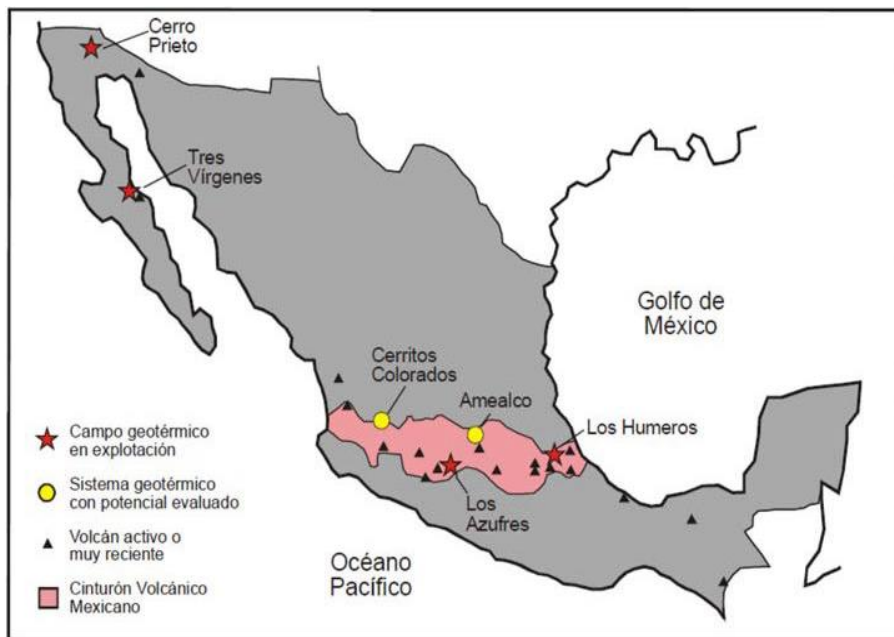
En dicha localidad se perforaron 17 pozos, sin embargo, no generó más de 600 kW, por lo que la planta se mantuvo generando hasta 1973. Siendo así México el tercer país en ocupar el recurso geotérmico para la generación de energía eléctrica. (Arellano Gómez, Iglesias Rodríguez , & García Gutiérrez, 2008)

El aprovechamiento de los recursos geotérmicos va en aumento en todo el mundo, y México no es la excepción. Los recursos geotérmicos tienen mayor probabilidad de existir en zonas geológicas de carácter volcánico, por lo que México es uno de los países con buenas perspectivas en la magnitud de este recurso natural.

Capacidad instalada y generación

A partir del inicio de la explotación geotérmica en México en los 60's, se comenzó por tener campos geotérmicos. Como los que CFE desarrolló los campos de Cerro Prieto en Baja California, Los Azufres en Michoacán y Los Humeros en Puebla. (Arellano Gómez, Iglesias Rodriguez , & García Gutiérrez, 2008)

Figura 12. Campos geotérmicos localizados en México



Obtenido de (Santoyo Gutiérrez & Torres Alvarado, 2010)

México cuenta con varios campos geotérmicos, como se visualiza en la figura anterior, en los que cada campo puede contar con una gran cantidad de yacimientos en los que se instalan pozos productores y de reinyección del recurso geotérmico.

En la siguiente tabla se describe la cantidad de pozos productores (pozos de extracción de fluido geotérmico) e inyectores (pozos por donde se devuelve el fluido geotérmico después de ser usados para generación energética al yacimiento para que conserve el carácter de recurso renovable) existentes en cada localidad y la capacidad instalada que se tenía en cada uno de ellos en el año 2016.

Tabla 4. Particularidades de los campos geotérmicos nacionales

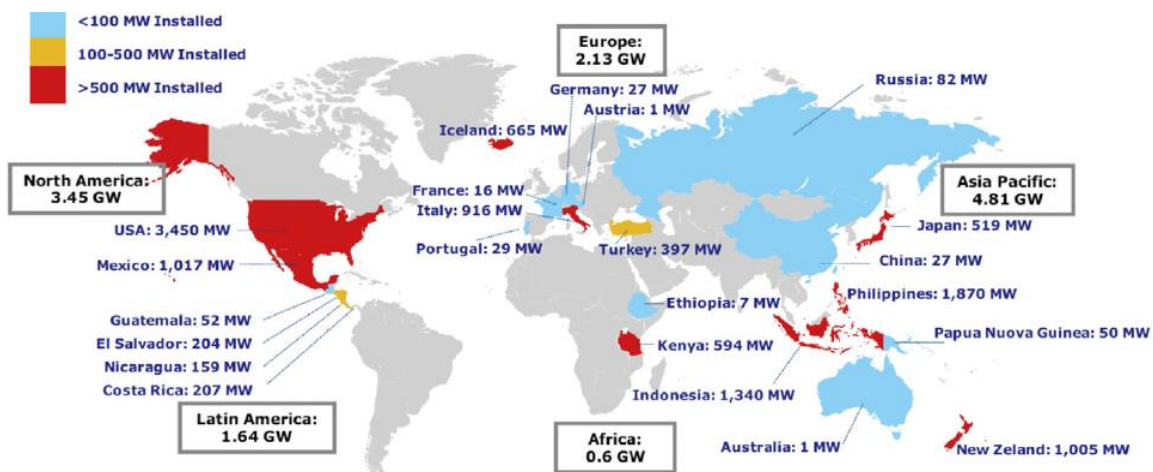
Campos geotérmicos	Localidad	Año de inicio	Número de pozos	Capacidad instalada en 2016
Cerro Prieto	Baja California	1973	160 productores 17 de reinyección	570 MWe
Los Azufres	Michoacán	1977	40 productores 6 de reinyección	248 MWe
Los Humeros	Puebla	1990	23 productores 2 de reinyección	94 MWe
Las tres Vírgenes.	Baja California Sur	1986	4 productores 2 de reinyección	10 MWe

Elaboración propia con datos de (CeMIEGeo, 2017).

De los 4 campos geotérmicos, el de Cerro prieto es el campo geotérmico más grande que existe en México, además de ser el más grande del mundo en líquido dominante, y su explotación ha sido también una de las más exitosas.

Debido a la capacidad instalada en México de 950 MWe en 2018 por medio de recurso geotérmico, se encuentra entre los primeros 5 países en instalación y generación de energía a nivel mundial. Siendo México superado por aquellos países que se denominan de primer mundo, entonces esto representa la gran cantidad que tiene el país de recurso geotérmico y que puede ser explotado.

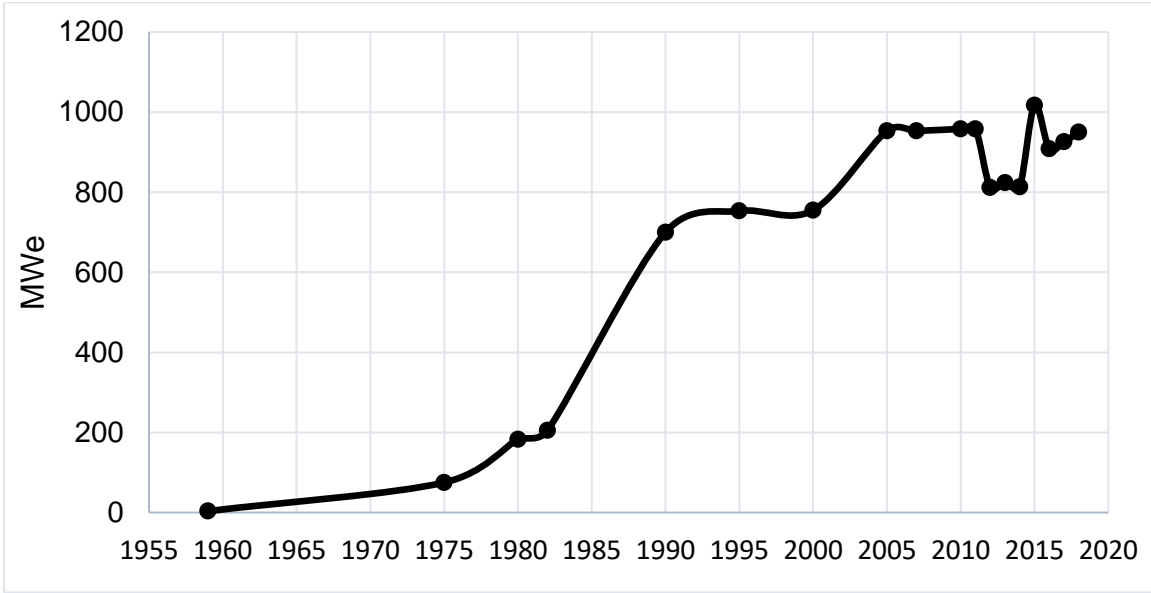
Figura 13. Potencia instalada para producción de energía eléctrica con fuentes geotérmicas 2015.



Obtenido de (Bertani, 2015).

En 2015 se tenían 1,017 MWe de potencia instalada nacionalmente, sin embargo, el recurso geotérmico se encuentra en estado dinámico, el cual anualmente va variando, como podemos observarlo en la siguiente figura.

Figura 14. Capacidad instalada (MWe) con recursos geotérmicos nacionalmente 1959-2018.



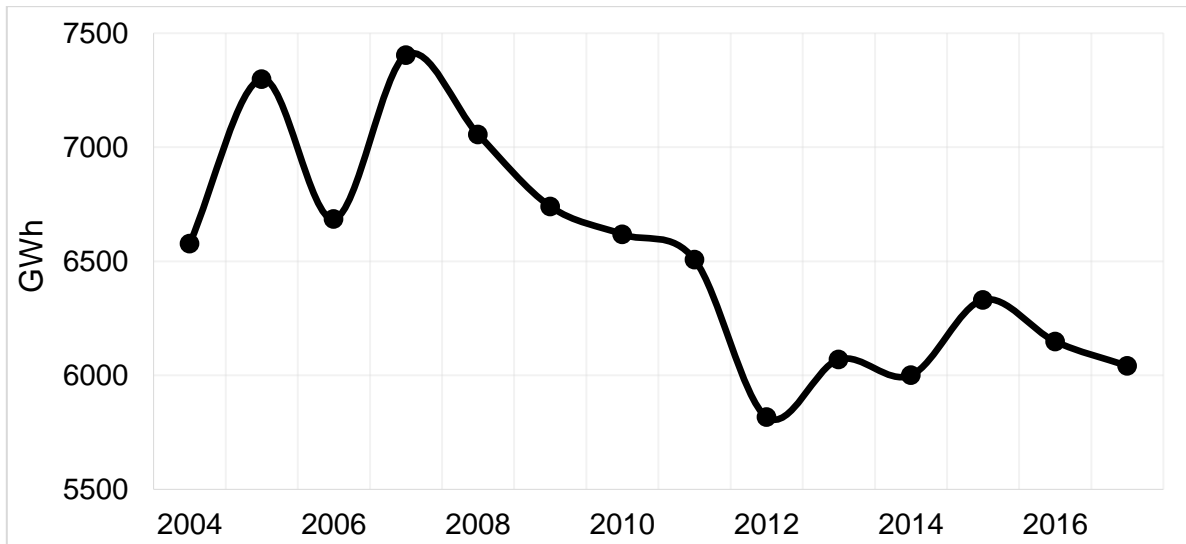
Elaboración propia con datos de (SENER, Sistema de Información Energetica, 2019).

En los años iniciales de explotación del recurso geotérmico, la capacidad instalada era menor a 200 MWe, en los años posteriores se observa el aumento en capacidad instalada, lo cual podemos ver como un aumento en instalación de plantas geotermoeléctricas, por consiguiente, si existe una disminución de capacidad instalada se ve como una planta que ha cumplido con su tiempo de vida.

Si bien la producción de fluido geotérmico es considerado dinámico, no se observa en la capacidad instalada su estado dinámico, sino que se observa en la generación de energía eléctrica, además de que las plantas geotermoeléctricas regularmente tienen una generación del 75% de la capacidad instalada, la cual podría ser por dos motivos; intentar conservar el reservorio lo más posible o la operabilidad de la planta.

En la figura 15 se observa la generación reportada anualmente y el comportamiento que se tiene, el cual está directamente asociada con la producción de fluido geotérmico.

Figura 15. Generación de energía eléctrica bruta (GWh) 2004-2017.



Elaboración propia con datos de (Beltrán Rodríguez , 2018).

La variación en la generación de energía eléctrica por medio del recurso geotérmico depende de la cantidad de pozos que se encuentren en operación, nivel energético del pozo y comportamiento productivo, como veremos más adelante en los capítulos posteriores, esto es de suma importancia en la producción eléctrica del sistema OCR.

2.4. CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS Y QUÍMICAS

El elemento clave del yacimiento es la fuente de calor, cuya existencia está, a miles de metros de profundidad, sólo puede deducirse a partir de evidencias indirectas que se aprecian en la superficie. (Maya González & Gutiérrez Negrín , 2007)

Los yacimientos geotérmicos pueden ser clasificados conforme a diferentes criterios: nivel energético, contexto geológico, modo de explotación y tipo de utilización.

La clasificación más común es la de nivel energético o capacidad calorífica del recurso, se clasifican en: baja, media y alta temperatura.

Tabla 5. Rangos de temperaturas de baja, media y alta temperatura de la fuente.

Autor	Baja (°C)	Media (°C)	Alta (°C)
FENERCOM.	50-120	120-200	>200
Llopis Trillo & Rodrigo Angulo.	30-90	90-150	>150
Santoyo & Barragán-Reyes.	<100	100-200	>200
Instituto Geológico y Minero de España.	<100	100-150	>150

Elaboración propia

Las características que presenta el fluido geotérmico en estado líquido varían dependiendo el yacimiento. Se denota que el aumento de temperatura del fluido es proporcional al aumento en toda la composición química.

Tabla 6. Análisis químico de fluidos de áreas geotérmicas en mg/kg*

Compuestos	Temperatura		
	81°C	100°C	130°C
pH	9.4	9.6	9.4
SiO ₂	71	130	167
B	0.04	0.03	0.05
Na	42	48	61
K	1.1	1.2	2.6
Ca	2.1	1.5	2.6
Mg	0.06	0.2	1.1
CO ₃	19	20	28
SO ₄	17	14	19
H ₂ S	0.3	0.3	0.4
Cl	11	19	35
F	0.7	0.4	1.1

**excepto el pH*

Obtenido de (Dickson & Fanelli, 2005).

El óxido de silicio (SiO_2) o comúnmente conocido como sílice, es uno de los compuestos que forman mayores incrustaciones en las tuberías.

Este hecho es que ciertas sustancias ligeramente solubles, vienen a ser menos solubles con temperaturas más elevadas. (Chapa H., 1967). Las incrustaciones en la tubería en su interior y exterior son proporcionales a la temperatura, si aumentan las incrustaciones, existirán bloqueos parciales en las tuberías y se tendrá menor flujo del fluido, así disminuyendo la capacidad de generación eléctrica que tendría el ciclo.

En equipos se genera una complicación debido a las formaciones de sales y la resistencia térmica que forman en los equipos donde se efectúa un intercambio de calor.

Para las incrustaciones que se generan dentro de la tubería y dentro del mismo pozo, existen métodos para limpiarla, lo cual se explicará más adelante.

2.5. COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO.

El comportamiento de los pozos geotérmicos no se puede caracterizar completamente ya que son dinámicos, no siempre se comportan de la misma forma unos y otros, no se puede prever en cómo será su comportamiento productivo hasta que se hace uso del pozo, sin embargo, se pueden hacer estimaciones a partir del comportamiento de algunos.

Por lo tanto, en este trabajo de tesis veremos más adelante en el capítulo tercero la estimación de producción de un pozo geotérmico de baja entalpía, el cual se trabajará con dos escenarios, uno en donde el tiempo de vida del proyecto culmina cuando el pozo decae en su producción y el otro en donde a partir del decaimiento se opta por estimular el pozo por uno de los métodos existentes.

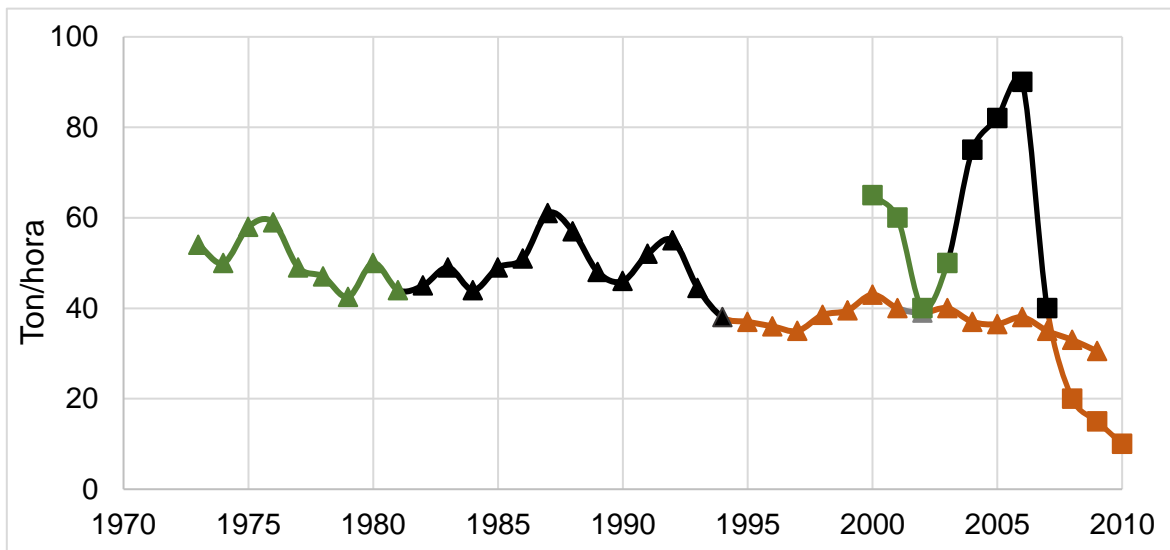
Generación de agua caliente

La producción de agua caliente del pozo no tiene un flujo constante, por lo tanto, los trabajos presentados de OCR en donde se considera un flujo térmico constante al sistema de generación eléctrica para estudios técnicos y económicos consideran un escenario fuera de la realidad, esa es la aportación de este trabajo, podemos resumirlo en la siguiente expresión:

“Si no se tiene un flujo constante de recurso geotérmico al OCR, no puede producirse energía eléctrica y térmica de forma constante durante todo el periodo de explotación del pozo”

Se puede sugerir que la producción del pozo se lleva a cabo en períodos, la primera se podría denominar la etapa inaugural, seguida por la etapa de apogeo, terminando con la etapa de declive.

Figura 16. Producción de fluido de pozos geotérmicos



Elaboración propia con datos de (Aguilar Dumas, 2010) y (Ramírez Montes & Morales Alcalá, 2012).

La grafica es acerca del comportamiento de producción del fluido de 2 pozos reales, la región verde es la que se denominara la inaugural, ya que se trata del inicio de la explotación del recurso, la zona negra es la de apogeo, porque es cuando se tiene

la mayor producción y la de declive es la región naranja que es cuando el fluido del pozo solamente va en descenso de producción.

Se puede observar que la producción de vapor se encuentra en estado dinámico, así demostrando que en ninguno de los años posteriores al inicio de la explotación se tienen el mismo valor.

Declive

La disminución de la producción es un proceso natural dentro de los yacimientos al ser explotados, se llega a reducir la producción debido a la obstrucción de la formación rocosa y/o de las tuberías del pozo, sea por acumulación de lodos, depósito de minerales, o incrustaciones tanto en tuberías y en paredes rocosas. (Ramírez Montes & Morales Alcalá, 2012)

La producción de vapor y/o líquido va decayendo por la explotación y sobreexplotación del pozo geotérmico.

La continua extracción del recurso provoca una caída de presión del yacimiento, haciendo que las propiedades termodinámicas no puedan ser las adecuadas para que el recurso fluya de manera natural y sea necesario inducirlo. Algunas veces las técnicas tradicionales no proveen de resultados satisfactorios y el yacimiento es considerado como agotado. Además, la despresurización provoca la intrusión de acuíferos aledaños, algunos de ellos someros normalmente de menor temperatura, provocando el enfriamiento del reservorio. (Aragón Aguilar & Izquierdo Montalvo , 2011)

Estimulación

Para la recuperación de producción del yacimiento, se estimula el yacimiento con técnicas de acidificación o estimulación ácida. Esto es, que el ácido penetra en la roca más allá de la zona cercana al pozo mejorando así la producción.

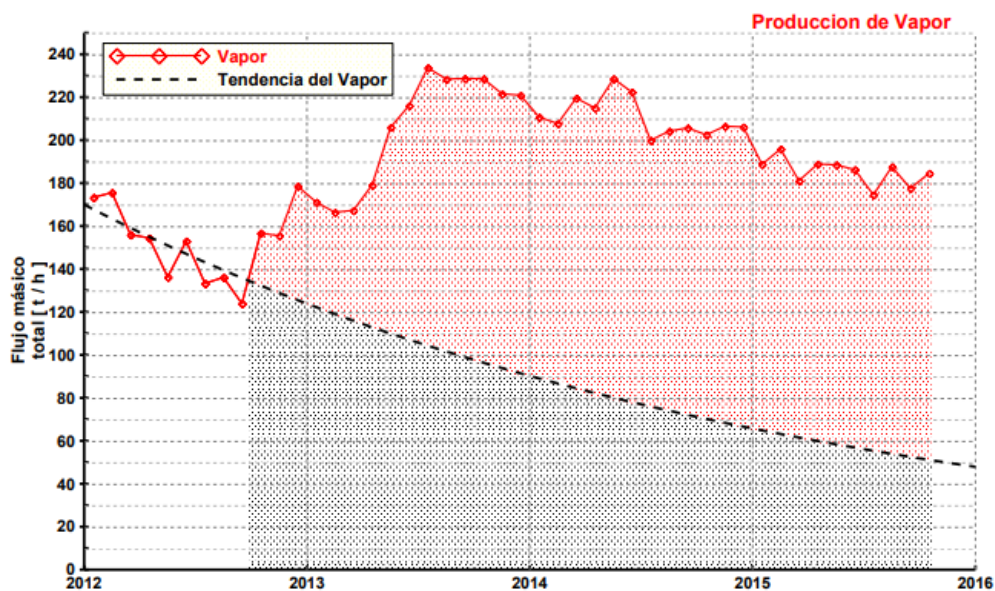
Esta técnica es utilizada en pozos cuya producción se ha reducido debido a la obstrucción en los poros y fractura o por formación de incrustaciones, comúnmente

utilizando HCl al 10%, y para la disolución de silicatos y sílice una mezcla de HCl y HF al 12% y 3% respectivamente. (Izquierdo Montalvo & Flores Armenta , 2012)

A pesar de existir métodos para el aumento en la producción de fluido geotérmico, también depende del tipo de yacimiento, de la roca, de los minerales y obstrucciones que tenga.

En general, la producción de cada pozo hasta antes de su estimulación ácida es superada por la producción obtenida después, aunque no llega a rebasar la producción inicial de su primera etapa productiva. (Morales Cardenas & Rodríguez Rodríguez, 2016)

Figura 17. Producción del pozo geotérmico localizado en Cerro Prieto, BC. después de la estimulación ácida



Obtenido de (Morales Cardenas & Rodríguez Rodríguez, 2016)

La tendencia de los pozos es disminuir su producción como se observa en la figura, por ello la estimulación es la practica viable para seguir con la explotación del recurso, se podría definir como el último recurso para continuar con la explotación de este. Sin embargo, es importante ver que la tendencia que se tiene después de la estimulación es a disminuir, ya no se observa aquella fluctuación como en la figura 20 de los inicios de la explotación.

Además, como se mencionaba acerca de que la producción de cada pozo es variable, en este caso no es la excepción, pues los pozos pueden responder de la manera más favorable después de la estimulación, como también puede que no lo sea, por ello es importante recalcar que la estimulación no es un procedimiento que asegure la producción del pozo, por ello se ha llevado a cabo este tipo de procedimiento en pocos pozos, como en algunos pozos de Los Humeros en Puebla, Cerro Prieto en Baja California .

A partir de lo visto en este capítulo se procederá a la estimación de comportamiento de un pozo geotérmico, generación y declive, y como se mencionó anteriormente se verá en dos escenarios, entonces también la estimación de estimulación. Todo ello por medio de un Ciclo Rankine orgánico simple y un Ciclo Rankine orgánico regenerativo, todo ello nos llevará a conocer cuál de ellos a de satisfacer con mayor generación energética y tendrá mayor rentabilidad económica.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DEL ORC CON FUENTE GEOTÉRMICA

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores la finalidad de los ciclos de potencia es la generación de energía eléctrica, como lo es el ORC, el cual opera con fuentes energéticas de baja entalpía, como lo son los sistemas geotérmicos de baja temperatura. Así, la generación de energía eléctrica por medio del ORC es función de la capacidad térmica de la fuente geotérmica de suministro y del fluido de trabajo empleado en el ORC.

El análisis de producción eléctrica no se puede considerar en estado estable en la vida del proyecto, ya que la generación de los pozos geotérmicos se encuentra en estado dinámico ya sea incrementando o disminuyendo, lo cual lo veremos más adelante. Por lo tanto, la producción eléctrica tiene un comportamiento directamente proporcional al recurso geotérmico.

3.1. SELECCIÓN DEL FLUIDO DE TRABAJO

Dependiendo del estado termodinámico del fluido geotérmico, se podrá seleccionar tal o cual fluido de trabajo. Por ejemplo, los pozos geotérmicos de baja temperatura tienen una estimación promedio de espesor de pozo de 1.5 km y cuentan una distribución de temperatura de fondo promedio de 110°C. (Pacheco Ibarra , 2019)

Como se menciona en el capítulo 1, los refrigerantes son fluidos orgánicos los cuales pueden ser empleados como fluidos de trabajo en un ORC, ya que tienen rangos de operabilidad conforme a la fuente térmica de alimentación (pozo geotérmico), teniendo así varios fluidos orgánicos posibles a utilizar conforme a esta temperatura.

Pero cabe destacar que dentro de los refrigerantes también tienen un rango de operabilidad, como se observa en la tabla 7.

Tabla 7. Fluidos de trabajo para ORC a diferentes rangos de temperaturas.

Temperatura de evaporación (°C)	Fluido de sugerencia
50-100	R134a, R24fa, R227ea, Hexano, R123, Butano y R141b
100-150	R236ea, R245fa, R11, R114, R245ca, R601a, R601, R141b y R113
150-200	R245fa, Benceno y Etanol
200-300	Butilbenceno y R123
250-500	n-hexano, n-pentano, tolueno, n-octano, n-decano

Obtenido de (Thurairaja, 2019).

Tomando como referencia que los pozos se encuentran a 110°C, se tomará como base los refrigerantes que operan a menos de 150°C, como lo son: R134a, R245fa, R11, R123, R152a y R245ca. Al considerar estos fluidos de trabajo para el ciclo, se debe conocer las propiedades termodinámicas y de impacto ambiental, siendo indispensable para la adecuada selección de fluido a utilizar.

Tabla 8. Propiedades de fluidos de trabajo orgánicos.

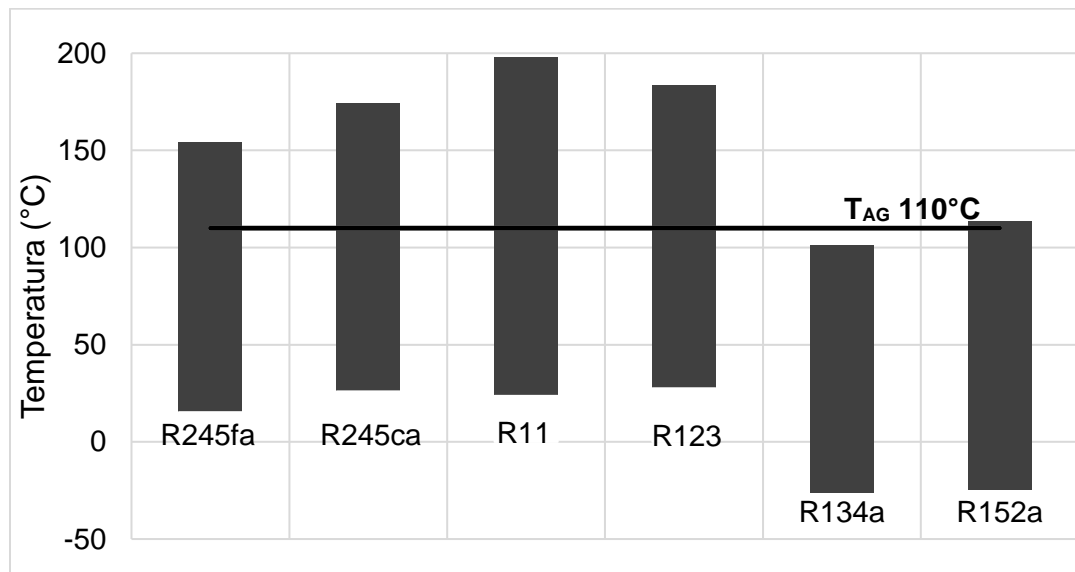
Impacto ambiental	Tipo	Fórmula química	Fluido	T _b	T _c	P _c
				(°C)	(°C)	(bar)
ODP GWP	CFC	CCl ₂ F	R11	23.7	197.96	44.076
ODP GWP	HCFC	CHCl ₂ CF ₃	R123	27.6	183.68	36.618
GWP	HFC	CF ₃ CH ₂ F	R134a	-26.1	101.1	40.59
GWP	HFC	CH ₃ CHF ₂	R152a	-24.7	113.26	45.168
GWP	HFC	CF ₃ CH ₂ CHF ₂	R245fa	15.3	154.1	36.51
GWP	HFC	CH ₂ FCF ₂ CHF ₂	R245ca	26	174.42	39.25

Elaboración propia.

Debido a los protocolos establecidos mundialmente el R11 y R123 al ser un CFC e HCFC respectivamente, son descartados por el impedimento de ser utilizados, debido a sus índices de ODP.

El R134a y R152a no presentan índice de ODP debido a que son HFC, sin embargo, fijando la temperatura de referencia de 110°C como la temperatura del fluido geotérmico a utilizar, la temperatura crítica de ambos fluidos se encuentra por debajo de la temperatura del fluido geotérmico como se ilustra en la figura 18.

Figura 18. Rango de T_b a T_c .



Elaboración propia

Los fluidos R245fa y R245ca podrían ser utilizados como fluido de trabajo, ya que sus características son adecuadas al gradiente de temperatura del fluido geotérmico, además de no presentar inconvenientes en su uso por sus nulos índices de ODP.

De acuerdo con lo anterior, el fluido de trabajo concierne al R245fa, debido a que la temperatura crítica del fluido se encuentra por debajo de la temperatura del fluido geotérmico, teniendo así propiedades adecuadas para el ORC, es el más utilizado en ORC comercial, además de determinar las propiedades en el software EES, en el cual se llevó a cabo el modelado del ORC.

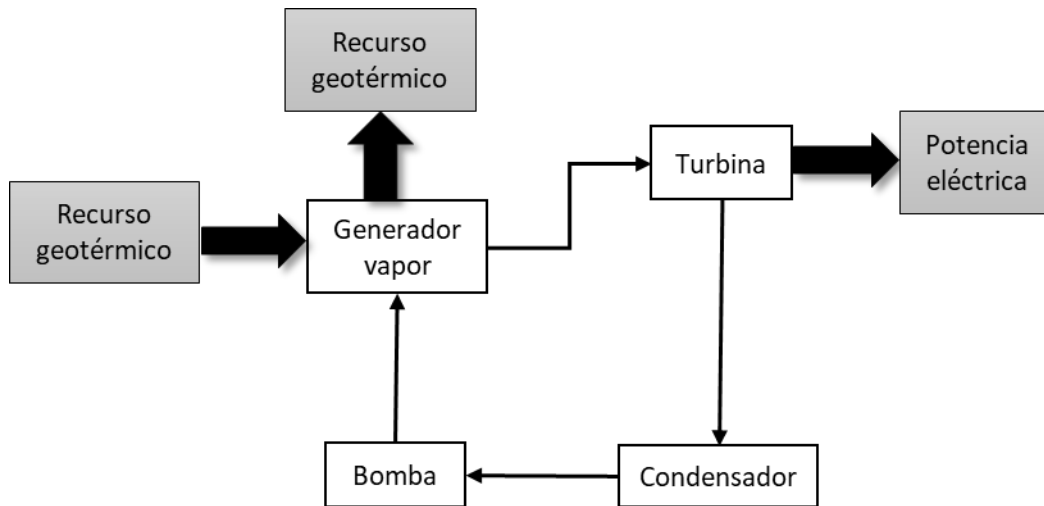
El rango de presiones utilizado para el refrigerante R245fa en un ORC es de 1.5 bar a 16.4 bar. Que en el sistema internacional de unidades corresponden a 150 kPa y 1640 kPa respectivamente. (Ruiz Casanova & Soto Sánchez , 2017)

3.2. CALCULO DE LOS CICLOS DE POTENCIA

CALCULO DEL ORC SIMPLE

Basándose en la imagen que se plasma en el cuadro 1, se tiene el ORC simple el cual consta de 4 equipos y cada corriente se puede denominar estados.

Figura 19. Diagrama de bloques del ORC simple



Elaboración propia con notas del curso de cogeneración del Dr. Rodolfo Herrera Toledo

Los datos que se conocen son el flujo y temperatura del fluido geotérmico, los cuales se basan en un pozo de baja/media entalpía:

$$\dot{m}_{\text{pozo}} = 180 \frac{\text{ton}}{\text{hora}} = 50 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$T_{\text{entrada}} = 110^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{salida}} = 70^{\circ}\text{C}$$

Se fijan las presiones de operación a partir del rango de operación del fluido R245fa, las cuales al finalizar con el modelado del ORCB, dentro del rango se verifican los valores que proporcionan mayor capacidad instalada, generación de energía y eficiencia del ciclo. Dando como mejores presiones de operación:

$$P_{\text{máxima}} = 1390 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{mínima}} = 202 \text{ kPa}$$

La energía que puede ceder el agua geotérmica al ciclo es:

$$\dot{E}_{AG} = \dot{m}_{\text{pozo}} * C_p * \Delta T$$

$$\dot{E}_{AG} = 50 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4.333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} * (383.15\text{K} - 343.15\text{K})$$

$$\dot{E}_{AG} = 8,667 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Estado 1:

$$\left. \begin{array}{l} s_{1i} = s_4 = 1.152 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \\ P_1 = 1390 \text{ kPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_{1i} = 245 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ T_{1i} = 307.3 \text{ K} \end{array}$$

Conforme al balance de energía de la bomba:

$$\dot{W}_{BAORC} = \dot{m}_{1R245fa} * h_1 - \dot{m}_{4R245fa} * h_4$$

$$\dot{W}_{BAORC_i} = 33.58 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left(245 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 444.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{W}_{BAORC_i} = 30.32 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Considerando la eficiencia mecánica de la bomba en 85%, se obtiene el trabajo real que requiere la bomba:

$$\dot{W}_{BAORC} = \frac{30.32 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{0.85}$$

$$\dot{W}_{BAORC} = 35.67 \text{ kW}$$

Del balance de energía, se obtiene la entalpía real de la corriente 1:

$$(\dot{m}_{4R245fa} * h_4) + \dot{W}_{BAORC} = \dot{m}_{1R245fa} * h_1$$

$$\left(33.58 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 444.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 35.69 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 33.63 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * h_1$$

$$h_1 = 245.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Siendo en el estado 1 real:

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = 245.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ P_1 = 1390 \text{ kPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_1 = 1.155 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \\ T_1 = 306.9 \text{ K} \end{array}$$

Estado 2:

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = 1390 \text{ kPa} \\ T_2 = 378 \text{ K} > T_{\text{saturación}@P_2} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_2 = 1.795 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \\ h_2 = 477.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{array}$$

Considerando una eficiencia mecánica en el generador de vapor del 90%, se obtiene la energía cedida del fluido geotérmico al refrigerante:

$$\eta_{\text{GV}} = \frac{\dot{E}_{\text{GV}}}{\dot{E}_{\text{AG}}}$$

$$\dot{E}_{\text{GV}} = \eta_{\text{GV}} * \dot{E}_{\text{AG}} = 0.90 * 8,667 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}_{\text{GV}} = 7,800 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Del balance de energía del GV-01, se obtiene el flujo másico del refrigerante en el ciclo:

$$\dot{E}_{\text{GV}} = \dot{m}_{\text{R245fa}} * (h_2 - h_1)$$

$$7,800 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = \dot{m}_{\text{R245fa}} * \left(477.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 245.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{m}_{\text{R245fa}} = 33.58 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Estado 3:

$$\left. \begin{array}{l} s_2 = s_{3i} = 1.795 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \\ P_3 = 202 \text{ kPa} \end{array} \right\} h_{3i} = 441.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para el cálculo de la turbina, el balance de energía viene dado de la siguiente manera para la obtención de potencia eléctrica que genera:

$$\dot{W}_{TVi} = \dot{m}_{3_{R245fa}} * (h_2 - h_{3i})$$

$$\dot{W}_{TVi} = 33.58 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left(477.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 441.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{W}_{TVi} = 1,198 \text{ kW}$$

Considerando la eficiencia mecánica de la turbina en 90%.

$$\eta_{TV} = \frac{\dot{W}_{TV}}{\dot{W}_{TVi}}$$

$$\dot{W}_{TV} = \eta_{TV} * \dot{W}_{TVi} = 0.90 * 1,198 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{TV} = 1,078 \text{ kW}$$

Siendo esta la cantidad de potencia producida por la turbina. A partir de la cual se obtiene la entalpía de la corriente 3 a partir del balance de energía.

$$\dot{m}_{2_{R245fa}} * h_2 = (\dot{m}_{3_{R245fa}} * h_3) + \dot{W}_{TV}$$

$$33.58 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 477.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \left(33.58 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * h_3 \right) + 1,078 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$h_3 = 445.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Teniendo así en el estado 3:

$$\left. \begin{array}{l} h_3 = 445.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ P_3 = 202 \text{ kPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_3 = 1.806 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \\ T_3 = 323.6 \text{ K} \end{array} \quad x_3 = 1$$

Estado 4:

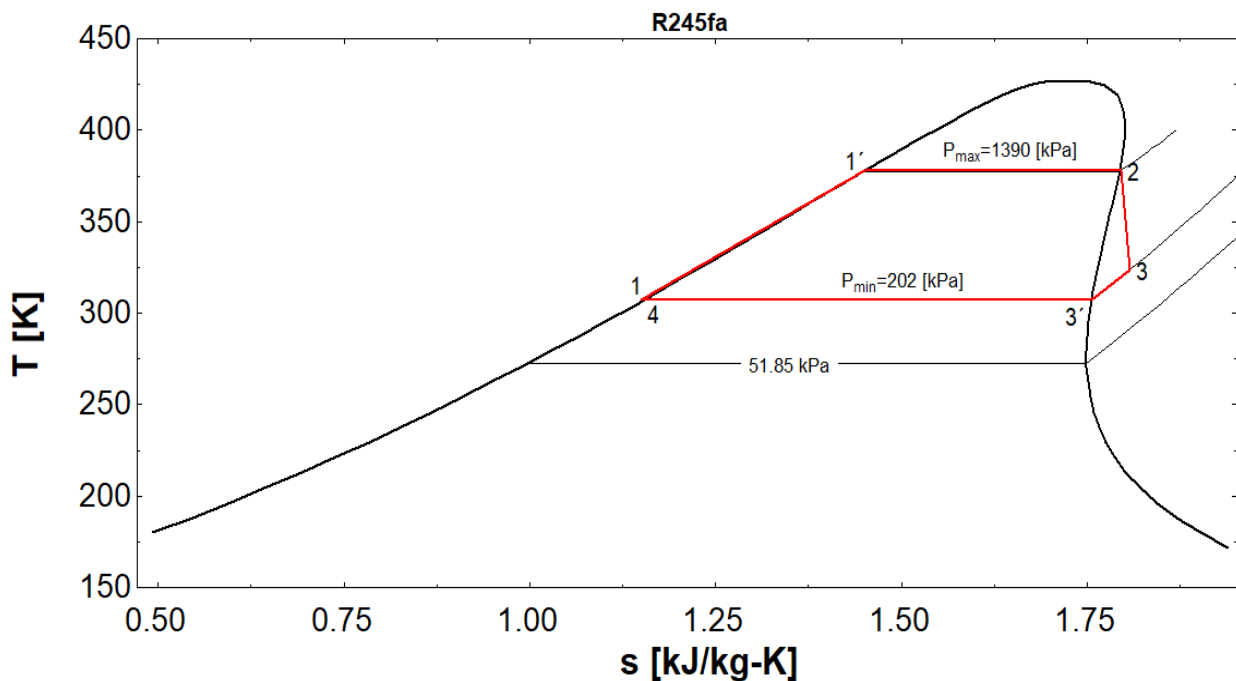
$$\left. \begin{array}{l} x_4 = 0 \\ P_4 = 202 \text{ kPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_4 = 1.152 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \\ h_4 = 244.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{array} \quad T_4 = 306.9 \text{ K}$$

La cantidad de energía que se rechaza en el condensador hacia el agua de enfriamiento se obtiene a partir del balance de energía:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\text{Condensador}} &= \dot{m}_{4\text{R245fa}} * (h_3 - h_4) \\ \dot{E}_{\text{Condensador}} &= 33.58 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left(445.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 244.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \\ \dot{E}_{\text{Condensador}} &= 6,758 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Teniendo así de los cuatro estados un diagrama T-s del ciclo, visualizando el cambio de fase en cada punto de cada estado. De los cuales 2 de ellos son isoentrópicos y los otros 2 isotérmicos.

Figura 20. Diagrama T-s del ciclo Rankine orgánico simple.



Elaboración propia

- 1-2 Adición de calor a presión constante en el generador de vapor
- 2-3 Expansión isentrópica en la turbina
- 3-4 Rechazo de calor a presión constante en el condensador
- 4-1 Compresión isentrópica en la bomba

En estado 3 se obtiene la generación de energía eléctrica bruta. Lo que quiere decir que es la generación a la salida del generador eléctrico, posteriormente se deberá de conectar la alimentación a los equipos que requieren de electricidad para su funcionamiento.

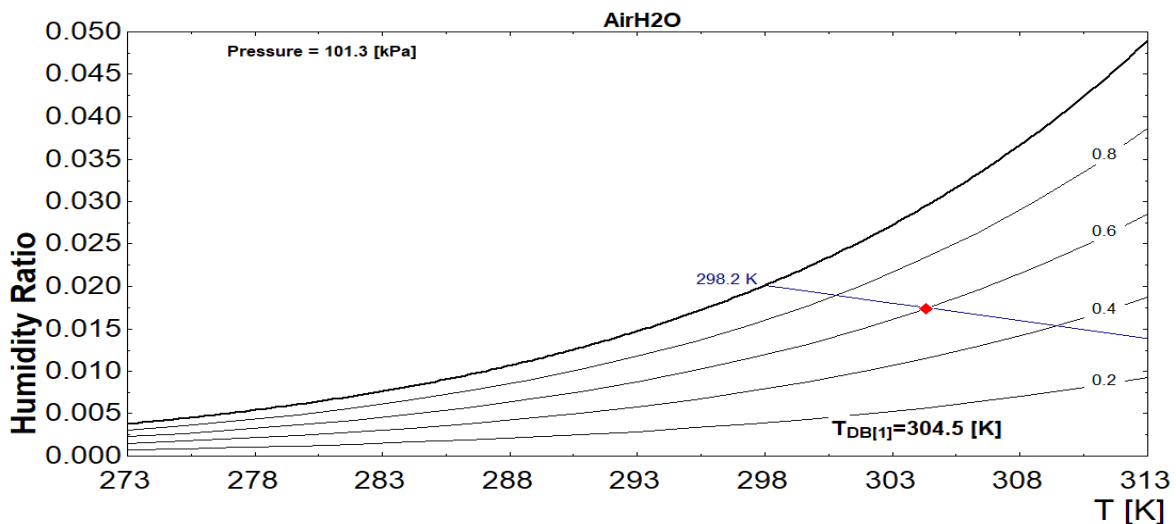
Para la obtención de la generación de energía eléctrica neta del ORC base, se requiere el gasto energético que generaran los servicios auxiliares (agua de enfriamiento) y los equipos de bombeo.

Consumo energético de los servicios auxiliares

Torre de enfriamiento (TE-01)

A partir de datos del campo geotérmico “Cerro prieto”, la humedad relativa promedio del aire es del 60%, presión de 101.325 kPa y una temperatura de bulbo húmedo de 25°C. Se obtienen datos del aire en base a la carta psicométrica a las condiciones antes mencionadas. (SEMARNAT, 2007)

Figura 21. Carta psicométrica a la entrada de TE-01



Elaboración propia

Se obtiene la temperatura de la corriente 8 que es la salida del condensador. Teniendo así en las corrientes o estados 7 y 8:

$$\left. \begin{array}{l} T_8 = 309.3 \text{ K} \\ P_{\text{descarga}} = 202 \text{ kPa} \end{array} \right\} h_8 = 151.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\left. \begin{array}{l} T_7 = 302.2 \text{ K} \\ P_{\text{succión}} = 101.325 \text{ kPa} \end{array} \right\} h_7 = 121.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

A partir del flujo volumétrico de entrada de aire, y teniendo la relación de números de ventiladores necesarios en la torre se obtiene la potencia necesaria para el funcionamiento de estos:

$$\dot{W}_{\text{TE}} = 54.99 \text{ kW}$$

Bomba de pozo geotérmico a GV-01 (BPE-01)

La bomba que extrae el fluido geotérmico del pozo a la superficie se considera de tipo centrífuga y considerando una eficiencia mecánica del 85%, para su cálculo se requieren de datos específicos como el Cp, densidad y viscosidad del fluido geotérmico a la temperatura específica, siendo el gasto energético de:

$$\dot{W}_{\text{BPE}} = 82.06 \text{ kW}$$

Bomba de TE-01 a CO-01 (BAT-01)

Al igual que la bomba anterior, esta es considerada centrífuga y se maneja la misma eficiencia mecánica.

$$\dot{W}_{\text{BAT}} = 2.911 \text{ kW}$$

Las plantas de ORC geotérmicas de baja temperatura también se caracterizan por un consumo auxiliar relativamente alto: las bombas llegan a consumir hasta más del 50% de la potencia de salida bruta. (Quoilin , 2013)

Capacidad instalada y producción energética

Todo lo calculado anteriormente es con el fin de conocer la capacidad instalada de la planta (MW) y la generación de energía eléctrica (GWh)

Teniendo que la potencia de energía eléctrica bruta por medio del generador es de:

$$\dot{W}_{TV} = 1,078 \text{ kW}$$

La capacidad instalada de la planta se obtiene restando el trabajo realizado por la turbina menos el consumo eléctrico de los equipos.

$$\dot{W}_{\text{netoORCBi}} = \dot{W}_{TV} - \dot{W}_{\text{BAORC}} - \dot{W}_{\text{TE}} - \dot{W}_{\text{BPE}} - \dot{W}_{\text{BAT}}$$

Sin embargo, no se puede considerar como el total debido a la eficiencia de la conversión mecánica-eléctrica que presenta el generador eléctrico, que generalmente se encuentra en 98.5%, entonces la generación de energía eléctrica es:

$$\dot{W}_{\text{OCRB}_{\text{eléctrica}}} = 1,078 \text{ kW} * 0.985$$

$$\dot{W}_{\text{OCRB}_{\text{eléctrica}}} = 1,062 \text{ kW}$$

Al igual que la turbina, a los equipos mecánicos se tiene que contemplar la eficiencia eléctrica, la cual corresponde a 98%.

Aplicando la eficiencia eléctrica:

$$\dot{W}_{\text{OCRB}_{\text{eléctrica}}} = 1,058 \text{ kW} - \frac{35.69 \text{ kW}}{0.98} - \frac{55.03 \text{ kW}}{0.98} - \frac{82.06 \text{ kW}}{0.98} - \frac{2.911 \text{ kW}}{0.98}$$

Teniendo así datos netos de instalación y generación del ciclo con un autoabastecimiento eléctrico. Obteniendo los parámetros importantes de la planta de generación eléctrica.

Capacidad instalada:

$$\dot{W}_{\text{OCRB}_{\text{neto}}} = 0.8826 \text{ MW}$$

Generación bruta anual:

$$\text{GWh} = 0.8826 \text{ MW} * \left(\frac{1\text{GW}}{1000\text{MW}} \right) * 24 \text{ hr} * 365 \text{ año}$$

$$\text{GWh} = 7.732 \text{ GWh año}$$

Por consiguiente, la eficiencia del ORC base corresponde a:

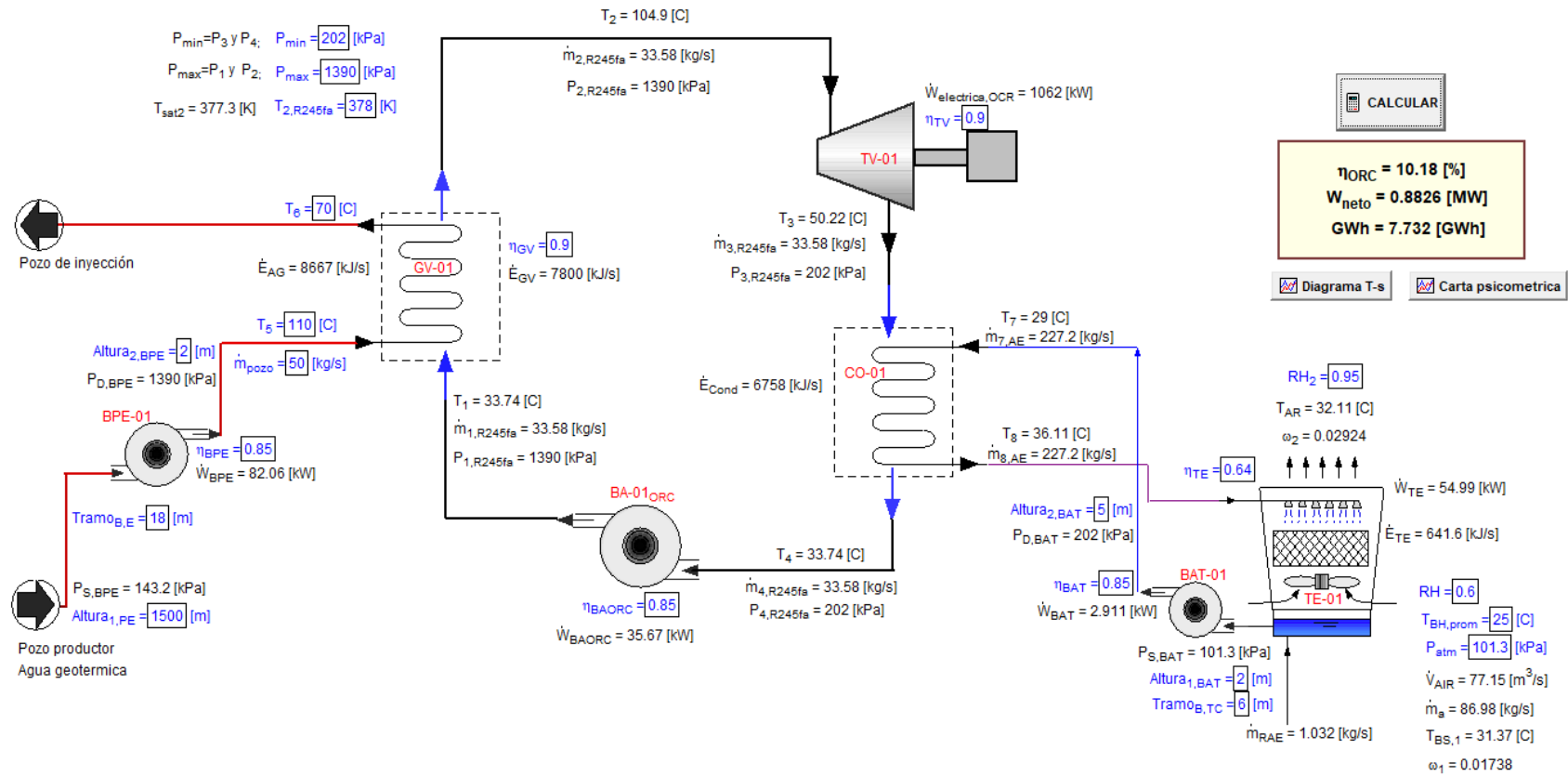
$$\eta_{\text{OCRB}} = \frac{W_{\text{neto}}}{\dot{E}_{\text{AG}}} = \frac{878.8 \text{ kW}}{8,667 \text{ kW}}$$

$$\eta_{\text{OCRB}} = 10.18 \%$$

Las eficiencias térmicas de primera ley (electricidad producida/energía térmica utilizada) en plantas de ciclo binario se encuentran típicamente entre 8 % y 12 % y dependen de las condiciones de temperatura de los lados caliente y frío del ciclo. (Rosyid, 2010)

Analizando así que la eficiencia del ciclo se encuentra dentro del rango de las plantas que comercialmente abastecen de energía eléctrica. (La tabla de balance de masa y energía se puede ver en el anexo B)

Figura 22. Diagrama del Ciclo Rankine orgánico simple.



Elaboración propia

CALCULO DEL ORC CON REGENERACIÓN

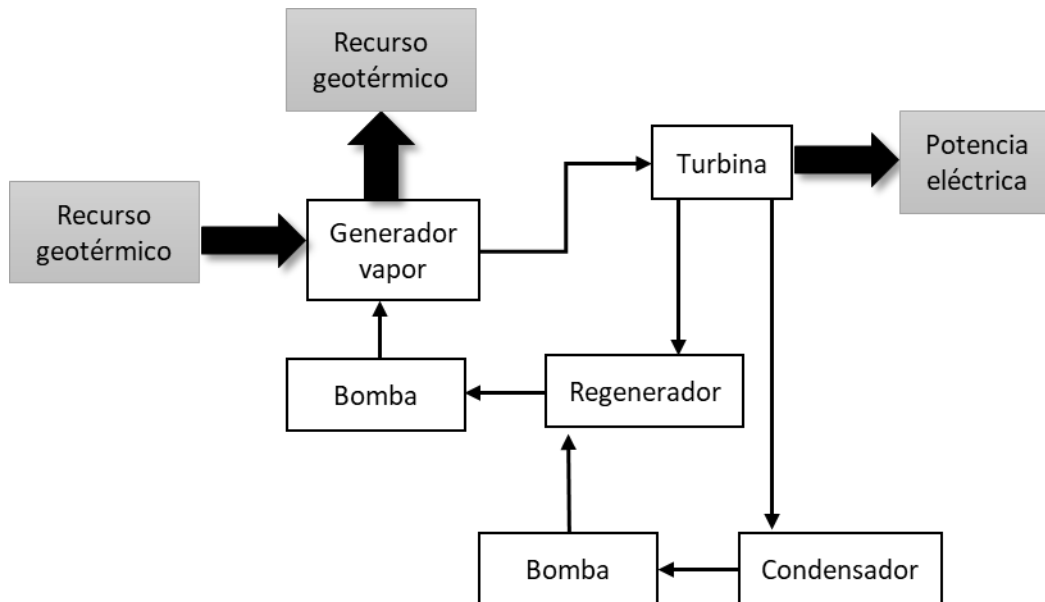
El ORC Regenerativo deberá tener una mayor eficiencia, consecuentemente una mayor capacidad instalada y generación de energía eléctrica. El ORC Regenerativo se calcula con las mismas condiciones iniciales del pozo geotérmico, que las condiciones que el ORC base, incluyendo las presiones.

$$P_{\text{máxima}} = 1390 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{mínima}} = 202 \text{ kPa}$$

Sin embargo, en el ORC Regenerativo no solo consta de $P_{\text{máxima}}$ y $P_{\text{mínima}}$, el vapor entra a la turbina a la $P_{\text{máxima}}$ y se expande isoentrópicamente hasta una P_{media} , se extrae una fracción de vapor y se envía al regenerador de agua mientras que el vapor restante continua su expansión hasta la $P_{\text{mínima}}$.

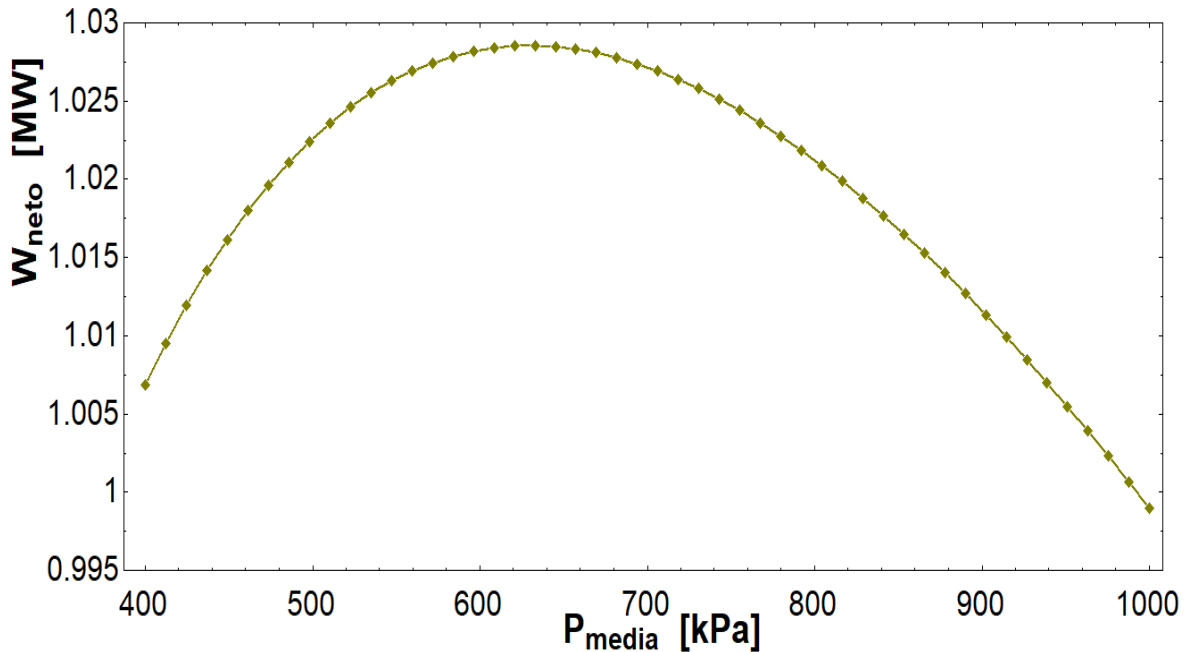
Figura 23. Diagrama de bloques de Ciclo Rankine orgánico con regeneración



Elaboración propia

La presión media ideal se obtiene al finalizar el modelado, ya que es la presión en la cual se tiene mayor capacidad instalada, en el software se establece un rango de 400 kPa a 1000 kPa.

Figura 24. Presión media ideal



Elaboración propia

Siendo la presión ideal aquella que se encuentra en la parte superior de la figura 24, siendo así:

$$P_{media} = 610 \text{ kPa}$$

El cálculo de estados termodinámicos, servicios auxiliares y balance de masa y energía del sistema regenerativo pueden verse de forma completa en el anexo B. A continuación, se muestran los cálculos base para la obtención de las potencias.

$$\dot{W}_{BAORC_{2i}} = \dot{m}_{1R_{245fa}} * (h_{1i} - h_{12})$$

$$\dot{W}_{BAORC_i} = 42.84 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left(295.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 294.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{W}_{BAORC_2} = \frac{27.71 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{0.85}$$

$$\dot{W}_{BAORC_2} = 32.59 \text{ kW}$$

A presión máxima y a T de saturación se obtiene el flujo másico del refrigerante por el ciclo.

$$\dot{E}_{GV} = \dot{m}_{2R245fa} * (h_2 - h_1)$$

$$7,800 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = \dot{m}_{2R245fa} * \left(477.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 295.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{m}_{2R245fa} = 42.84 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

La potencia obtenida en la turbina en expansión hasta la P_{mínima} viene dada con el subíndice TV2, mientras que a P_{media} está dada con el subíndice TV1.

$$\dot{W}_{TV2i} = \dot{m}_{3R245fa} * (h_2 - h_{3i})$$

$$\dot{W}_{TV2i} = 33.03 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left(477.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 441.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 1,178 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{W}_{TV2i} = 1,178 \text{ kW}$$

$$\eta_{TV} = \frac{\dot{W}_{TV2}}{\dot{W}_{TV2i}}$$

$$\dot{W}_{TV2} = \eta_{TV} * \dot{W}_{TV2i} = 0.90 * 1,178 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{TV2} = 1,060 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{TV1i} = \dot{m}_{10R245fa} * (h_2 - h_{10i})$$

$$\dot{W}_{TV1i} = 9.803 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left(477.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 462.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 146.5 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{W}_{TV1i} = 146.5 \text{ kW}$$

$$\eta_{TV} = \frac{\dot{W}_{TV1}}{\dot{W}_{TV1i}}$$

$$\dot{W}_{TV1} = \eta_{TV} * \dot{W}_{TV1i} = 0.90 * 146.5 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{TV1} = 136.2 \text{ kW}$$

La energía del condensador que se rechaza en el condensador:

$$\dot{E}_{\text{Condensador}} = \dot{m}_{4R245fa} * (h_3 - h_4)$$

$$\dot{E}_{\text{Condensador}} = 33.03 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left(445.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 244.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{E}_{\text{Condensador}} = 5,127 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}_{\text{Condensador,real}} = \eta_{\text{Condensador}} * \dot{E}_{\text{Condensador,i}}$$

$$\dot{E}_{\text{Condensador,real}} = 0.9 * 5,127 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}_{\text{Condensador,real}} = 5,983 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

La potencia de la bomba

$$\dot{W}_{\text{BAORC}_{1i}} = \dot{m}_{11R245fa} * (h_{11i} - h_4)$$

$$\dot{W}_{\text{BAORC}_{1i}} = 33.03 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left(244.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 244.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{W}_{\text{BAORC}_{1i}} = 10.25 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{W}_{\text{BAORC}_1} = \frac{10.25 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{0.85}$$

$$\dot{W}_{\text{BAORC}_1} = 12.06 \text{ kW}$$

Para este modelo regenerativo se tiene la fracción de vapor en:

$$\dot{m}_{12R245fa} = \dot{m}_{10R245fa} + \dot{m}_{11R245fa}$$

$$\dot{m}_{12R245fa} = (\dot{m}_{12R245fa} - \dot{m}_{11R245fa}) + \dot{m}_{11R245fa}$$

$$\dot{m}_{12R245fa} * h_{12} = (\dot{m}_{12R245fa} - \dot{m}_{11R245fa}) * h_{10} + \dot{m}_{11R245fa} * h_{11}$$

$$42.84 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 294.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \left(42.84 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - \dot{m}_{11\text{R}245\text{fa}} \right) * 463.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left(\dot{m}_{11\text{R}245\text{fa}} * 244.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{m}_{11\text{R}245\text{fa}} = 33.03 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{10\text{R}245\text{fa}} = \dot{m}_{12\text{R}245\text{fa}} - \dot{m}_{11\text{R}245\text{fa}}$$

$$\dot{m}_{10\text{R}245\text{fa}} = 42.84 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 33.03 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

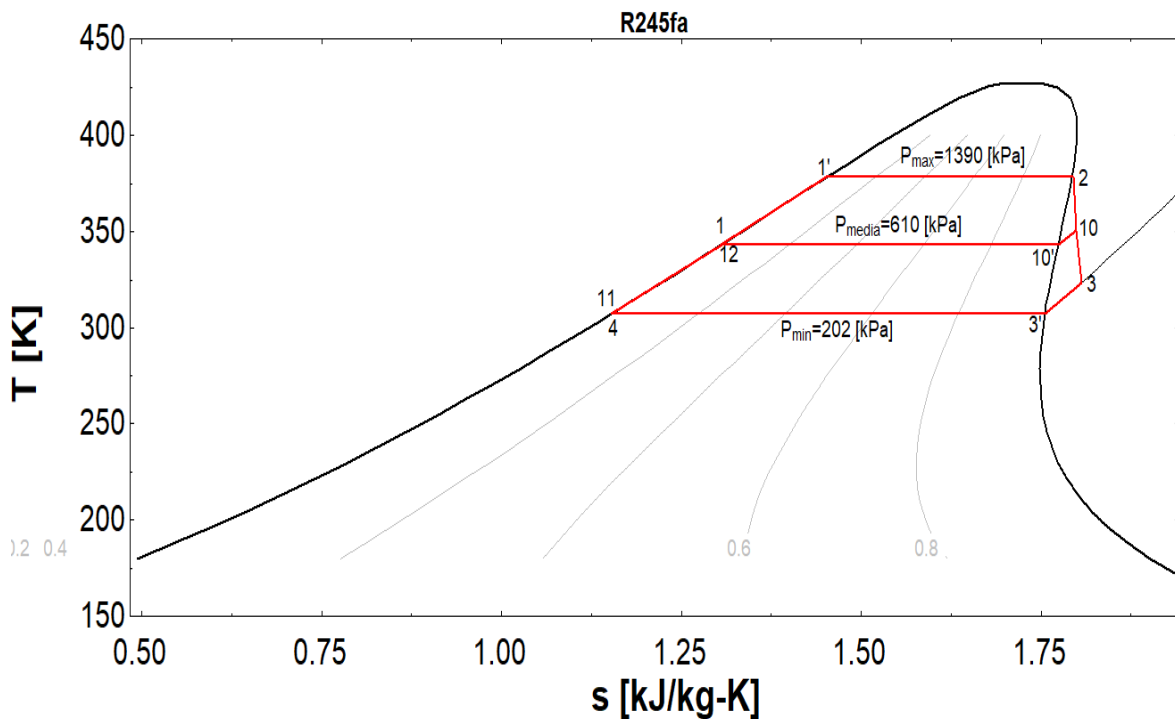
$$\dot{m}_{10\text{R}245\text{fa}} = 9.803 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$y_{10} = \frac{\dot{m}_{10\text{R}245\text{fa}}}{\dot{m}_{12\text{R}245\text{fa}}}$$

$$y_{10} = 0.2288$$

Teniendo así siete estados en el diagrama T-s del ciclo.

Figura 25. Diagrama T-s del ciclo Rankine orgánico regenerativo.



Elaboración propia.

Donde visualizando el punto de cada estado:

1-2 Adición de calor a presión constante en el generador de vapor

2-3 Expansión isentrópica en la turbina

3-4 Rechazo de calor a presión constante en el condensador

4-11 Compresión isentrópica en la bomba

11-12 Adición de calor a presión constante

12-1 Compresión isentrópica en la bomba

2-10 Expansión isentrópica en la turbina

10-12 Reducción de calor a presión constante

Al igual que en ORC base, se calculan los gastos energéticos de los servicios auxiliares y los equipos externos al ciclo.

Consumo energético de los servicios auxiliares

Torre de enfriamiento

Con un flujo masico de agua de enfriamiento de:

$$\dot{m}_{AE} = 137.9 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Finalizando un consumo energético del ventilador de la torre de enfriamiento:

$$\dot{W}_{TE} = 31.33 \text{ kW}$$

Bomba de TE-01 a CO-01 (BAT-01)

Teniendo las mismas consideraciones al ser una bomba centrifuga con eficiencia mecánica del 85%:

$$\dot{W}_{BAT} = 1.351 \text{ kW}$$

Capacidad instalada y producción energética

La generación que puede tener la turbina viene dada por el área de media y baja presión, lo que significa que la capacidad y generación está dada por la suma de ambas.

$$\dot{W}_{TV1} = 136.2 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{TV2} = 1,060.8 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{TV_T} = 1,197 \text{ kW}$$

Considerando la eficiencia eléctrica que presenta la turbina del 98.5%, la generación de energía eléctrica en la turbina es de:

$$\dot{W}_{ORCR_{\text{eléctrica}}} = 1,197 \text{ kW} * 0.985$$

$$\dot{W}_{ORCR_{\text{eléctrica}}} = 1,179 \text{ kW}$$

También, los equipos que requieren de energía eléctrica se les tiene que contemplar la eficiencia eléctrica, la cual corresponde a 98%.

Aplicando la eficiencia eléctrica:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{OCRB_{\text{eléctrica}}} &= 1,179 \text{ kW} - \frac{12.06 \text{ kW}}{0.98} - \frac{32.59 \text{ kW}}{0.98} - \frac{31.41 \text{ kW}}{0.98} - \frac{82.06 \text{ kW}}{0.98} \\ &\quad - \frac{1.351 \text{ kW}}{0.98} \end{aligned}$$

Obteniendo así la capacidad instalada:

$\dot{W}_{OCRB_{\text{neto}}} = 1.016 \text{ MW}$

Generación bruta anual:

$$\text{GWh} = 0.8901 \text{ MW} * \left(\frac{1 \text{ GW}}{1000 \text{ MW}} \right) * 24 \text{ hr} * 365 \text{ año}$$

$$\mathbf{GWh = 8.901 \text{ GWh año}}$$

Por consiguiente, la eficiencia del ORC base corresponde a:

$$\eta_{\text{ORCB}} = \frac{W_{\text{neto}}}{\dot{E}_{\text{AG}}} = \frac{1.016 \text{ kW}}{8,667 \text{ kW}}$$

$$\mathbf{\eta_{\text{ORCB}} = 11.72 \%}$$

La eficiencia aumenta en relación con el ORCB, aun encontrándose en el rango de las eficiencias que tienen los ciclos de potencia.

A continuación de cada uno de los resultados de ambos ciclos los podemos comparar en la tabla 9.

Tabla 9. Comparación entre el ORCB y ORCR

	ORC simple	ORC regenerativo
Capacidad instalada (MW)	0.8826	1.016
Generación bruta (GWh año)	7.732	8.901
Eficiencia (%)	10.18	11.72

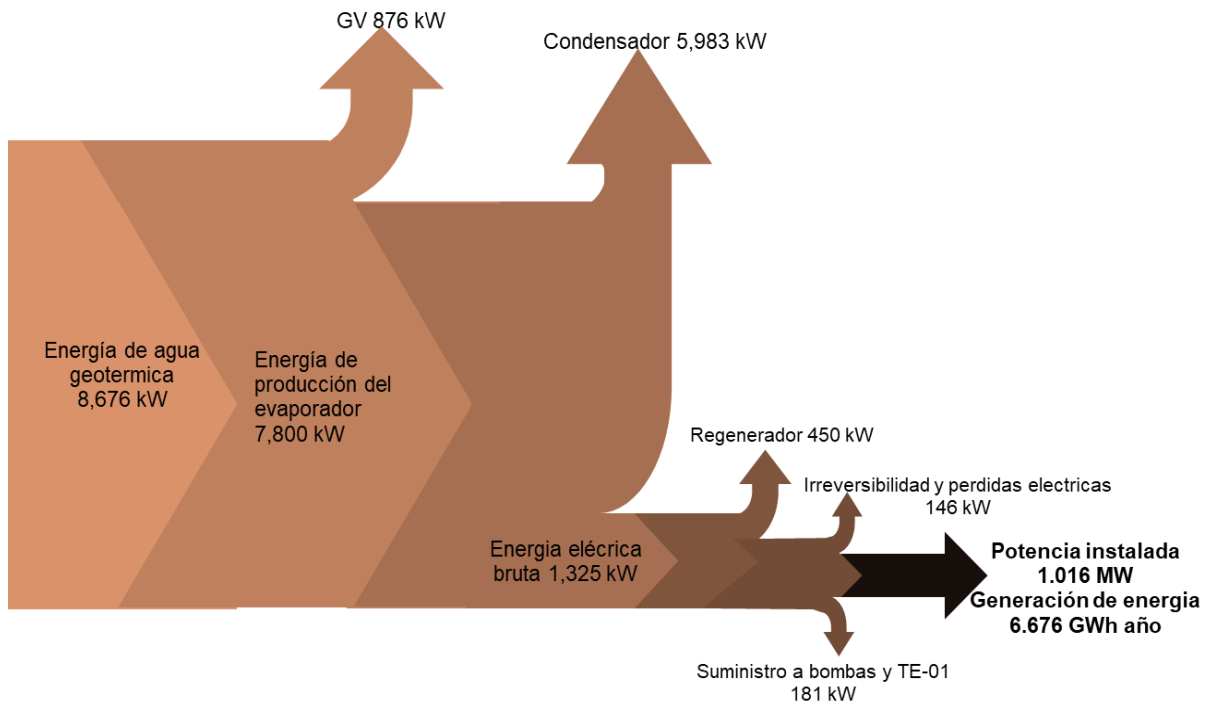
Tabla de elaboración propia

En la cual en los tres resultados del ciclo regenerativo tiene mayores cifras comparado con el simple, a pesar de tener las mismas condiciones del fluido geotérmico, se observa que la regeneración aumenta la productividad de uno respecto al otro.

Siendo el regenerativo la base para la elaboración de la figura 26, debido a la mayor producción.

El flujo de la energía que transfiere el fluido geotérmico al orgánico y la producción de energía neta, se puede observar en el diagrama de Sankey a continuación.

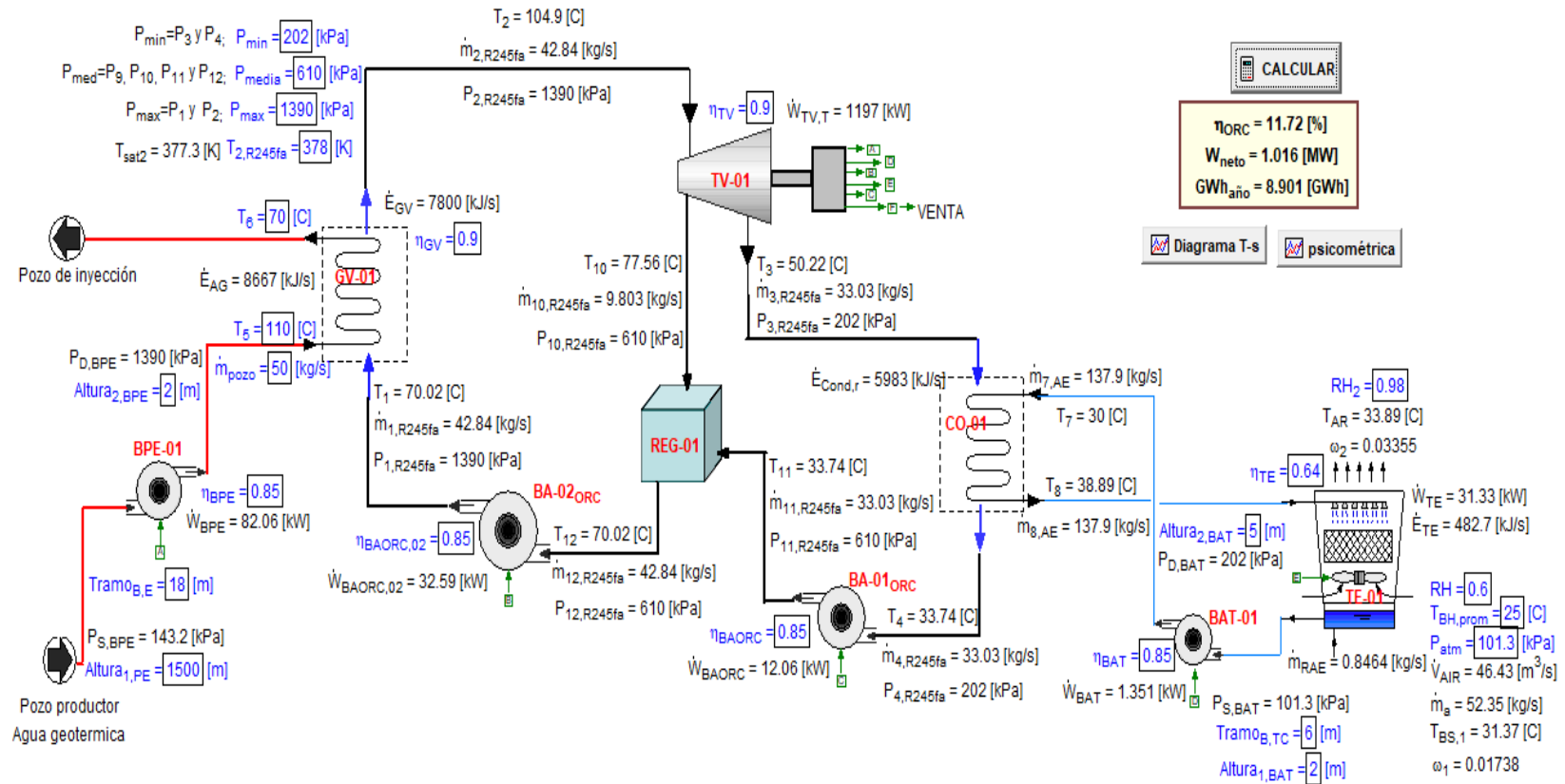
Figura 26. Diagrama Sankey del ORC regenerativo.



Elaboración propia

En el cual podemos interpretar que la mayor parte de energía se va en el condensador, y solo una pequeña parte es convertida en energía neta para suministro.

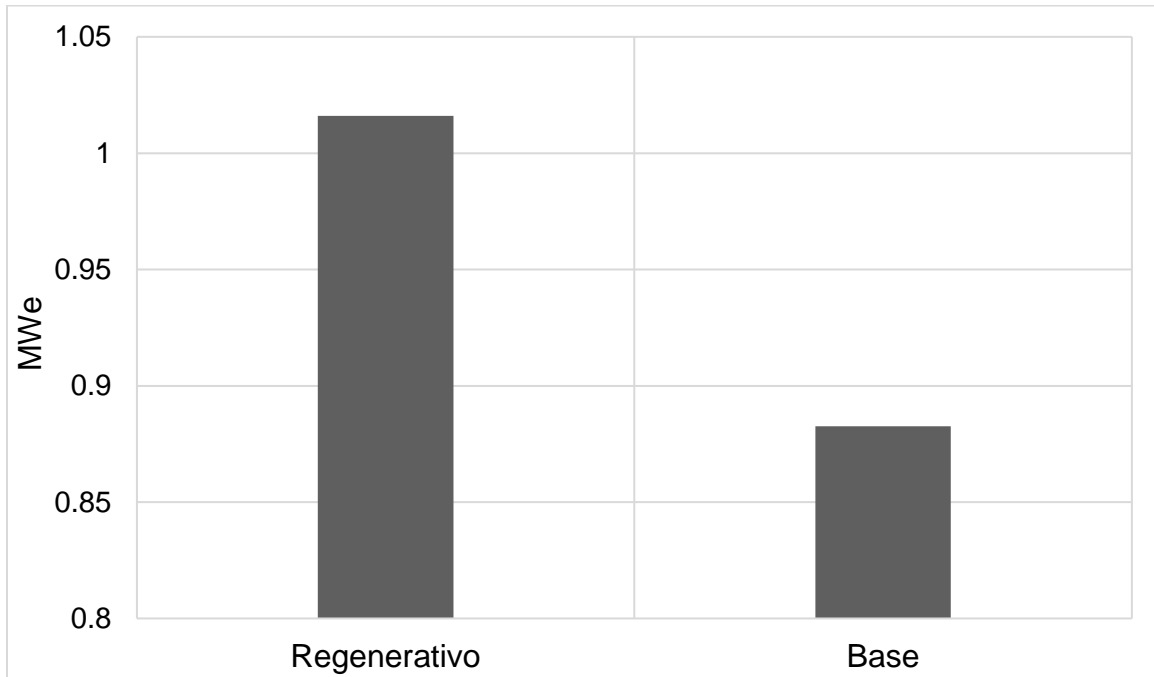
Figura 27. Diagrama del Ciclo Rankine orgánico regenerativo.



Elaboración propia

Como se observó en la tabla 9, el ORCR tiene un aumento en la eficiencia del 13% respecto al ORCB. Lo cual se ve reflejado en la capacidad de MW instalados y los GWh de generación de energía eléctrica en el año inicial de explotación del recurso.

Figura 28. MW eléctricos instalados en el ORCB y ORCR



Elaboración propia

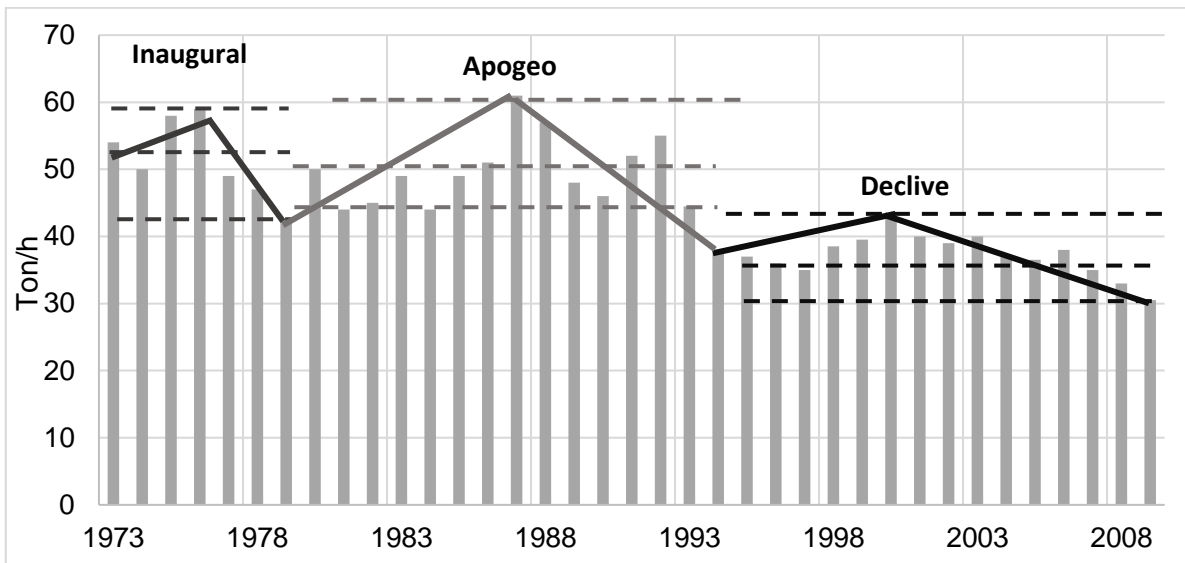
Por ello el análisis de los perfiles de carga se realizan del ORC regenerativo, ya que sería el más adecuado por la mayor eficiencia generación que presenta, respecto al base.

3.3. PERFILES DE CARGA

En base a la figura 16, se definió que los pozos geotérmicos tienen un lapso de vida en tres etapas, la primera se definió como la etapa inaugural, seguida por la de apogeo, terminando con la de declive.

Analizando la producción de flujo masico que se presenta en el campo geotérmico de Cerro prieto, en Baja California. Se ha dividido conforme a las tres etapas.

Figura 29. Producción en ton/h de fluido geotérmico en campo geotérmico de Cerro prieto, BC.



Elaboración propia con datos de (Aguilar Dumas, 2010) y con notas del curso de cogeneración de Dr. Rodolfo Herrera.

Donde, las líneas gruesas representan las tres etapas en las que se divide la producción en el tiempo de explotación y las líneas punteadas son el máximo, promedio y mínimo de producción en cada etapa.

Basándose en los datos obtenidos de producción del pozo geotérmico localizado en Cerro prieto, se fundamenta el cálculo del pozo productor de 180 ton/h para el cual se basó el ORCR. Teniendo la producción de fluido geotérmico en 30 años de explotación, el cual es el tiempo estimado de vida útil en todo proyecto geotérmico. (Hiriart Le Bert, 2011)

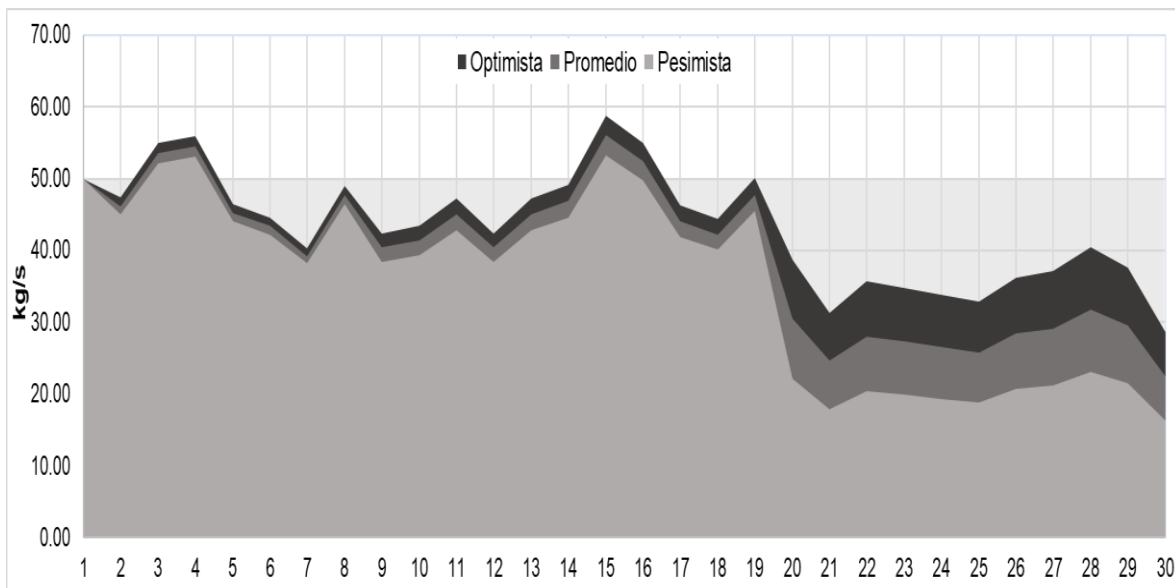
A partir del caso base se obtiene el promedio de producción de fluido geotérmico en cada una de las etapas, con el cual se obtiene el porcentaje de disminución y aumento en cada año con respecto al año anterior.

Consiguientemente el promedio de cada etapa se divide entre el dato inicial de producción de fluido geotérmico, dando así al porcentaje promedio de producción

en cada etapa, donde se puede tomar un escenario optimista, base (promedio) y pesimista de producción.

Para así finalmente con el valor promedio de cada etapa y el porcentaje de aumento/disminución de cada año se obtienen los valores para el caso de estudio, en un escenario optimista, promedio y pesimista.

Figura 30. Comportamiento productivo del fluido geotérmico.



Elaboración propia.

En donde el recuadro gris claro, indica una constante de producción de 50 kg/s, y se aprecian 3 series de datos, los cuales representan los tres tipos de escenarios que se pudiesen presentar en el caso de estudio, los datos arrojados de los 3 escenarios muestran que la producción del fluido no se mantiene en los 30 años proyectados como un flujo constante.

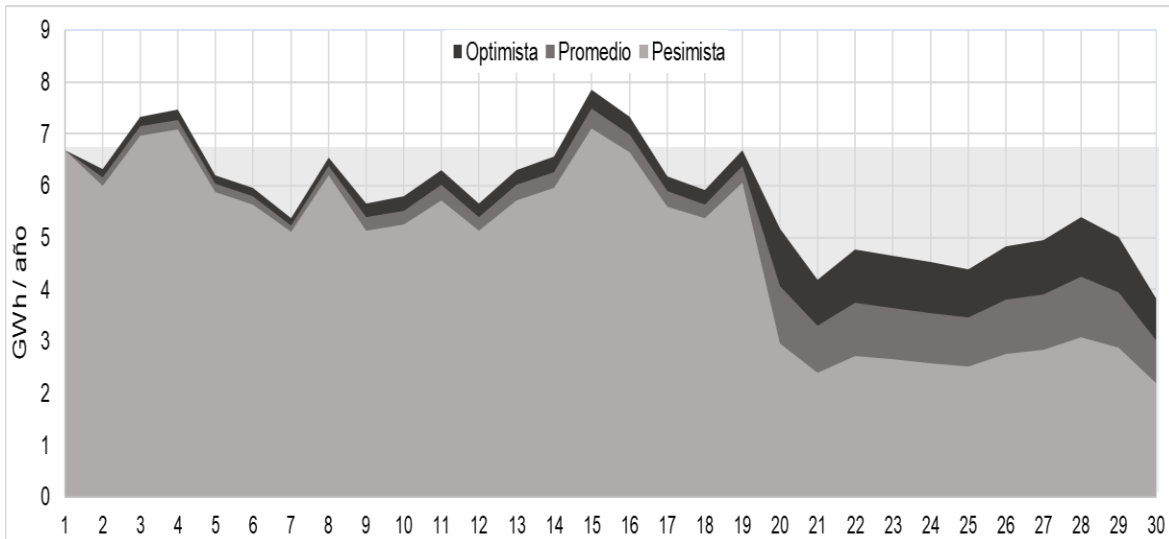
La tendencia del pozo es a disminuir, aún en un escenario optimista de este, que si bien el descenso no es tan marcado como en el escenario pesimista, si se cuenta con una caída en la producción.

Por lo tanto si la producción de fluidotérmico va en descenso, por ende la generación de energía eléctrica bruta y total tenderá a disminuir, ya que el ciclo Rankine

orgánico va de la mano con la producción del fluido termico para la producción eléctrica.

Así, con el software EES se obtiene el cálculo de la generación de energía eléctrica total para venta, a partir de la cantidad de fluido geotérmico en el año.

Figura 31. Generación energética con ORCR anual.



Elaboración propia.

Se observa que la figura anterior tiene la misma tendencia o forma que la figura 30. Lo que significa que la generación energética es proporcional al fluido geotérmico.

En donde se demuestra que el primer año de producción no es igual a los posteriores, lo cual repercutiría en la parte económica si se toma el primer año como un dato constante en los años de vida del proyecto.

Estimulación

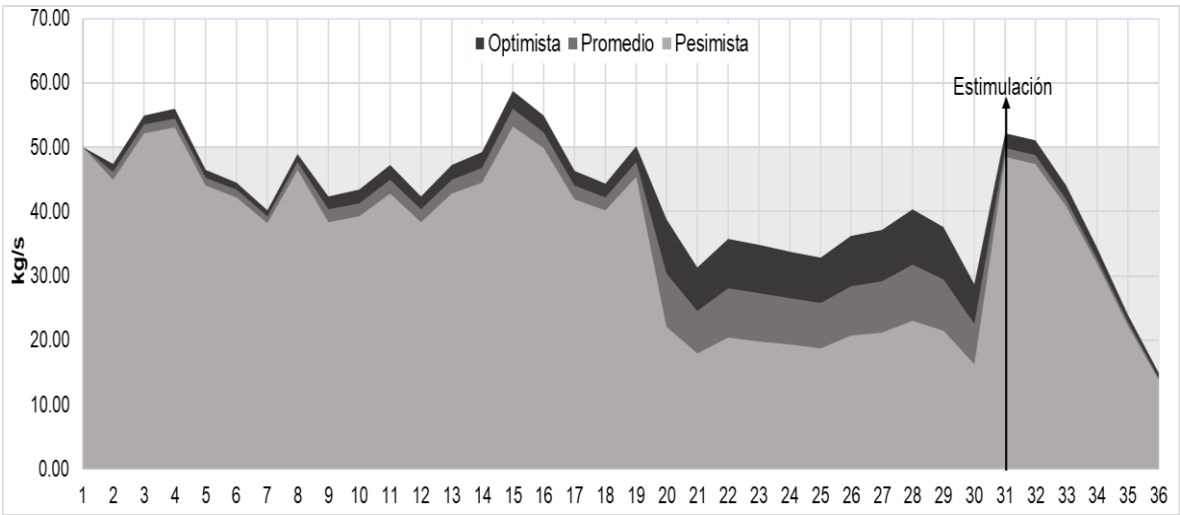
La estimulación de los pozos geotérmicos como se mencionó en el capítulo 2, se llevan a cabo para aumentar la producción del fluido geotérmico cuando este ya ha cesado de producir o es muy escaso comparado con su producción inicial. Regularmente siendo menor al 50% de la producción inicial.

Por ello, tomando como base la estimulación del pozo geotérmico que se muestra en la figura 17, localizado en Cerro prieto, BC. En el cual se observa que tiene aumento de producción en la estimulación del 188% respecto al último dato de producción antes de esta. Seguido en los años posteriores de disminución en la producción.

Considerando el comportamiento del pozo y la tendencia de los 3 años posteriores a la estimulación se toman para el caso del presente trabajo, sin embargo, la disminución en la producción es dicho pozo es del 8% anual a partir de la estimulación.

Por ello se hará la estimación en los años posteriores a los datos que se tienen del pozo real, en donde después del año 30 se procede a la estimulación. Como se muestra a continuación.

Figura 32. Comportamiento productivo del fluido geotérmico con estimulación.

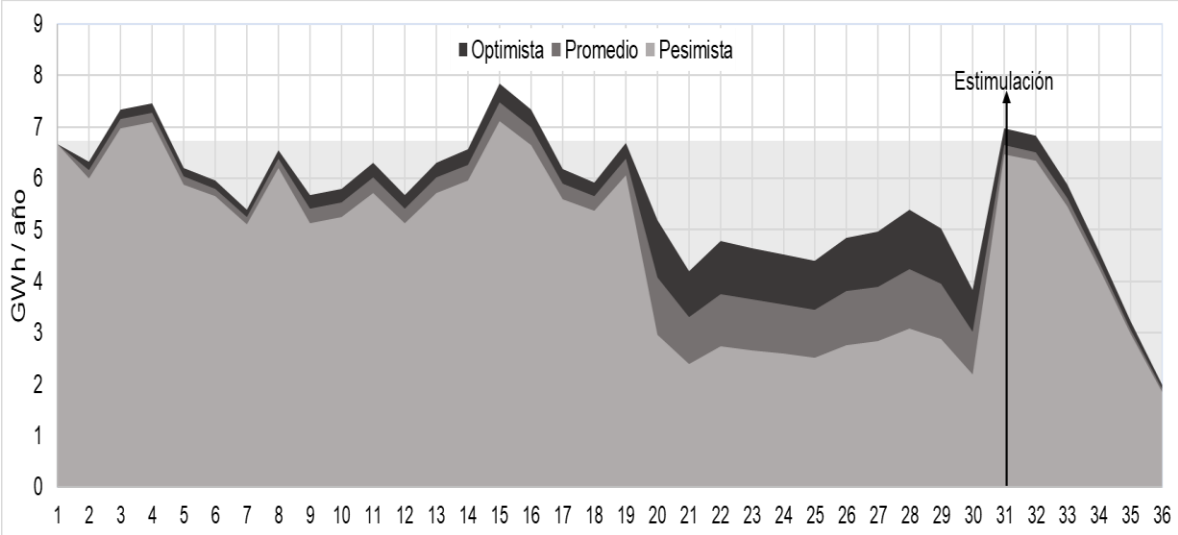


Elaboración propia

En el cual se visualiza que el aumento en la producción es menor a la producción inicial, como ocurre en la mayoría de los casos. Sin embargo, en los 6 años posteriores a la estimulación se vuelve a la producción menor del pozo antes de la estimulación.

Como en el caso anterior sin estimulación, la generación de energía eléctrica neta es proporcional a la producción del fluido geotérmico, y el punto mínimo de producción se toma cuando alcanza el dato antes de que se diera la estimulación.

Figura 33. Generación energética con ORCR con estimulación.



Elaboración propia

Teniendo así en los 36 años de proyecto aun con estimulación un declive de producción, los cuales al igual que el caso anterior se tiene un impacto económico en la venta de energía eléctrica la cual es generada por medio del ciclo orgánico. Y cuyos números económicos veremos en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

Como parte del cuarto capítulo, se lleva a cabo un análisis económico del ciclo Rankine orgánico regenerativo, ya que se determinó con mayor capacidad instalada y producción de energía eléctrica.

El análisis económico permite juzgar la conveniencia de realizar o no una inversión, midiendo los beneficios que la inversión pudiese generar y para los cuales se calculan los siguientes indicadores clave de rentabilidad de una inversión. (Morales Castro)

- Valor actual neto (VAN) o Valor presente neto (VPN).
- Tasa interna de retorno (TIR).
- Periodo de retorno de inversión (ROI, por sus siglas en inglés Return of Investment) (Baca Urbina, 2010)

El ORCR se analiza en tres casos, en el cual se consideran los perfiles de carga que se aprecian capítulo anterior, para así concluir que caso se considera con los mejores indicadores.

- ORCR caso base, en el cual se considera la vida del proyecto cuando llega al declive.
- ORCR con estimulación, se considera la vida del proyecto y al llegar al declive se opta por estimulación química, para aumentar la vida del proyecto.
- ORCR estacionario, se lleva a cabo el análisis sin contemplar la variación de producción del pozo, el cual no es un caso realista ya que un sistema geotérmico es un sistema dinámico, como lo hemos visto a lo largo de este trabajo, sin embargo, este análisis nos servirá de referencia de cómo se llevan a cabo normalmente la determinación de los valores económicos y cuál es la variación con respecto a los demás escenarios, y si se aleja demasiado de los 2 casos antes mencionados.

Determinación de costos

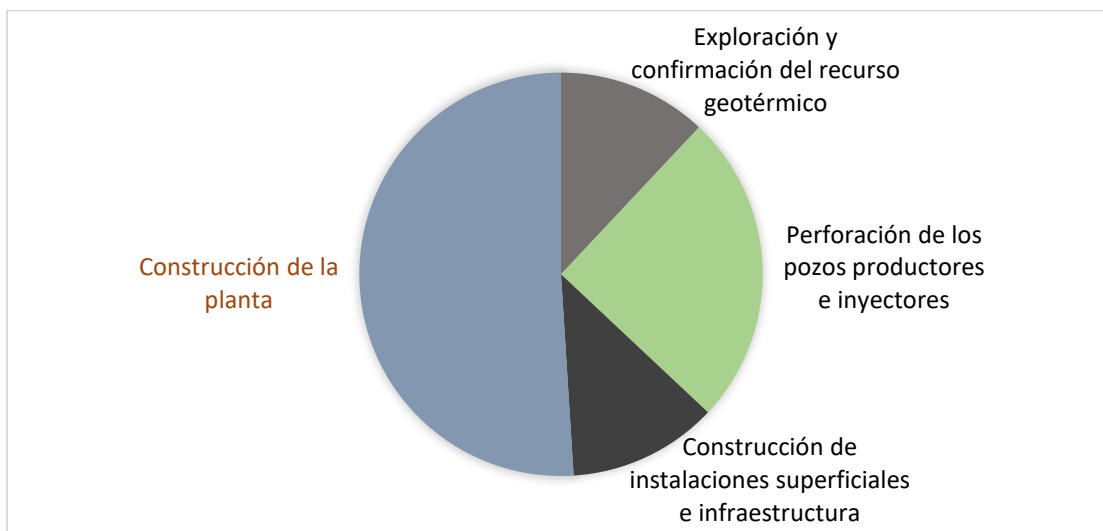
Se puede decir que el costo es un desembolso en el pasado (costos hundidos, por ejemplo, la compra de un artículo valioso, el cual no se puede revender por el precio con el que se compró, además de que no tienen efecto para propósitos de evaluación), en el presente (costos de inversión), futuro (costos futuros) o en forma virtual (costo de oportunidad).

La inversión inicial comprende la adquisición de los activos fijos y diferidos necesarios para iniciar operaciones de la empresa. Se entiende por activo fijo a los bienes propiedad de la empresa (terrenos, edificios, maquinaria, equipo, otros), se les llama fijos porque no puede desprenderse de ello sin que ocasiona problemas a las actividades productivas, y como activos diferidos es el conjunto de bienes propiedad de la empresa necesarios para su funcionamiento (patentes, marcas, diseños comerciales, gastos de instalación, contratos de servicios, etc.). (Baca Urbina, 2010)

Costos de inversión fija

Los costos de inversión de proyectos geotermoeléctricos se pueden dividir en cuatro componentes, de estos se tiene un porcentaje aproximado del costo de inversión que se tiene para cada componente.

Figura 34. Promedio del porcentaje del costo de inversión.



Elaboración propia

A partir de los cuatro componentes que se observan en la figura 34, se describen a continuación las acciones que engloban los costos de cada componente y el rango de promedio de los costos.

Tabla 9. Costo de inversión según cada componente

Componentes	Descripción de los componentes	Porcentaje
Exploración y la confirmación del recurso geotérmico	Adquisición de los terrenos Obtención de licencias y permisos ambientales y de uso del suelo necesario Ejecución de los estados de exploración Perforación de pozos exploratorios	10-15%
Perforación de los pozos productores e inyectores	Perforación de los pozos finales productores e inyectores	20-35 %
Construcción de instalaciones superficiales e infraestructura	Líneas de conducción de los fluidos geotérmicos Construcción de caminos de acceso	10-20 %
Construcción de la planta	Turbina, generador, condensador, subestación eléctrica, transmisión para conectarse a la red.	40-81 %

Elaboración propia con datos de (Goldstein & Hiriart, 2011)

Los costos totales de inversión dependen completamente del tipo de planta, como se explicaba en el capítulo 1, existen diferentes tipos de plantas para la explotación del recurso geotérmico, según las características dadas de este.

Con base en datos registrados, los costos de inversión que se proponen son en base a una planta de ciclo binario que tiene una capacidad instalada de 1 MW, lo cual corresponde a un aproximado por el modelo elaborado en el software EES.

En el cual el autor Hiriart, en el informe “Tecnologías de punta y costos asociados para generación distribuida , autoabastecimiento y cogeneración con recursos geotérmicos en México.” para una planta de ciclo binario con una capacidad instalada de 1 MW el costo unitario total de inversión es de \$5,025 USD/kW en 2009 contemplando los 4 componentes. Tomando en cuenta únicamente el costo por equipo del ORCR es de \$3,000 USD/kW, el cual se tomará en cuenta, para realizar

el siguiente análisis, en el cual se tiene que realizar una escalación en los costos para que vayan de acuerdo con los del 2020.

Costos de operación y mantenimiento

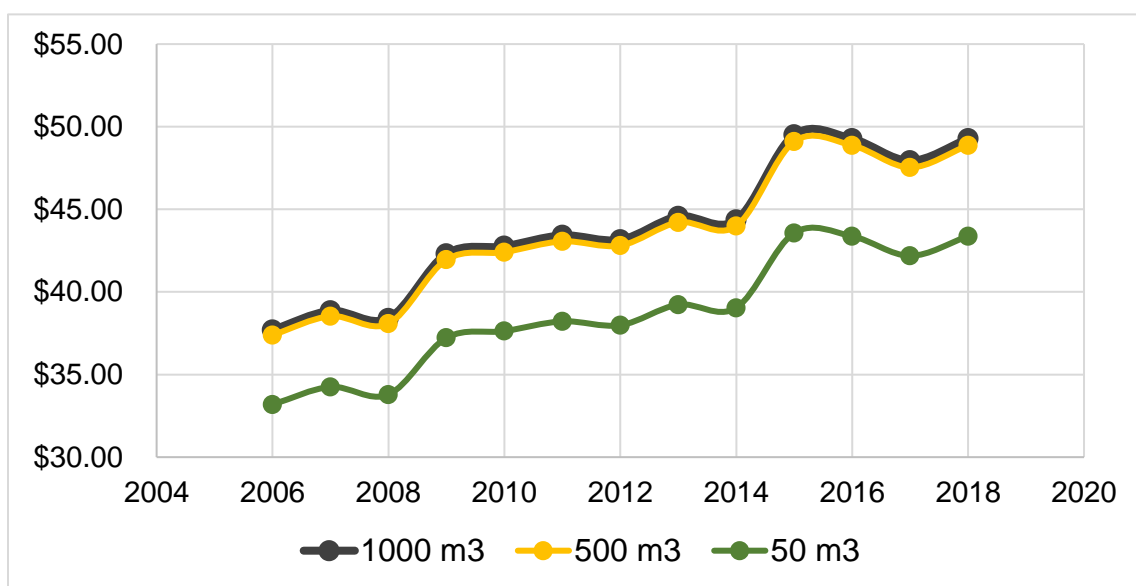
Los costos de O&M consisten en costos fijos y variables relacionados directamente con la generación de electricidad (costos del personal y equipo para la operación y manejo del campo, la operación de los pozos y el mantenimiento de todas las instalaciones). Estos costos varían dependiendo del tipo de planta, pero se concluye que para plantas comerciales de ciclo binario de capacidad superior a 300 kW el rango de costos de O&M va de 88 a 210 dólares anuales por kW instalado en 2009.

Considerando el costo promedio y el mismo porcentaje que se tiene por costo del ORCR, el costo por O&M se considera en 53.83 USD/kW anual para 2009.

Costos variables

Dentro de los costos variables se engloban los servicios de agua y energéticos. Los costos por consumo energético son subsidiados por la planta. Teniendo como gasto variable el servicio de agua, de la cual se hace uso para el servicio de enfriamiento en la TE-01. Como se muestra en la figura 35.

Figura 35. Tarifa de agua tipo industrial Mexicali, Baja California 2002-2055.

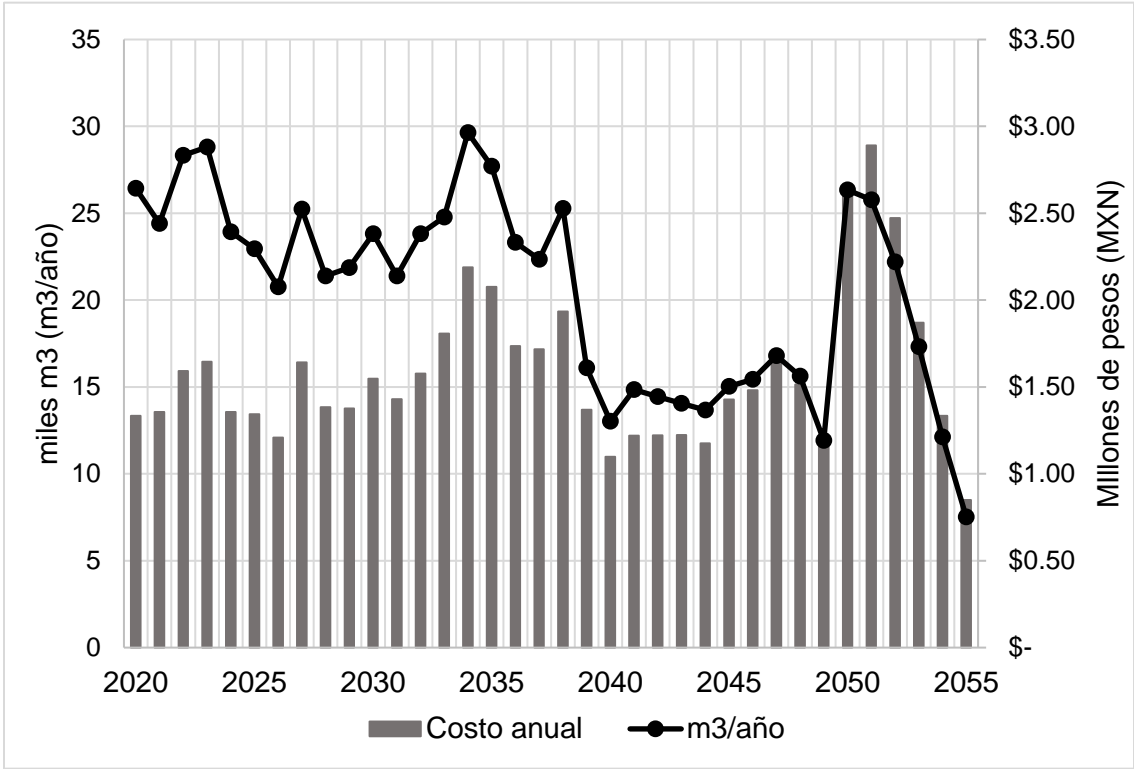


Elaboración propia con datos de (SITAP, 2018)

En el cual se observa el aumento en la tarifa de este servicio en la región de Mexicali, Baja California, en donde la tarifa por consumo de agua industrial es dependiendo de los metros cúbicos, cada uno de ellos teniendo su propia tarifa como se muestra en la figura 35, pero cada una de ellas va en aumento, por ello se ha llevado a cabo una estimación de la tarifa para el tiempo de vida del proyecto.

Obteniendo la estimación de la tarifa y a partir de los m³ consumidos de agua de la TE-01 se obtiene la figura 36.

Figura 36. Relación de millones de pesos por metros cúbicos consumidos.



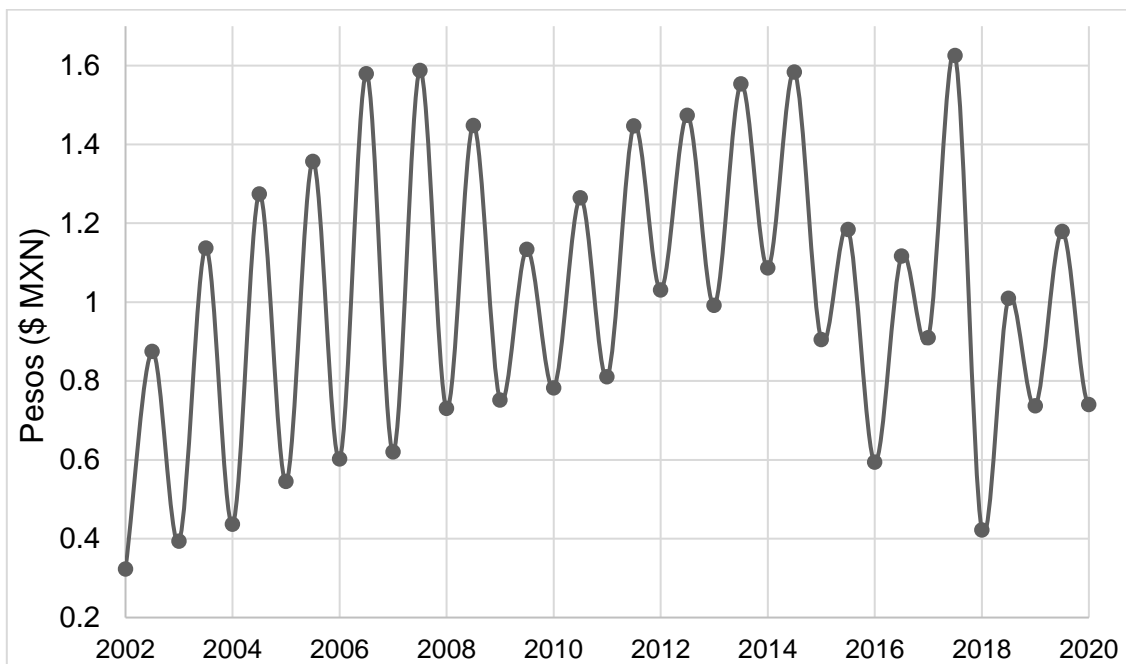
Elaboración propia

Se observa que, en los primeros años, se tiene de los mayores consumos del insumo y los costos más bajos en relación con el consumo, comparado a los últimos años, en los cuales se visualiza que el costo es mayor al consumo de agua, así viendo el aumento en la tarifa de agua, en una relación de \$/m³.

Ingresos

Los ingresos se estiman a partir del costo de energía eléctrica en la entidad de Baja California, para servicio general en media tensión, en dicha entidad el precio de este insumo varía dependiendo de la temporada en que se encuentre, por ello se contempla la tarifa durante invierno y verano (enero y junio respectivamente), siendo la base para la estimación en el periodo de vida del proyecto, los años 2002 al 2020, como se muestra en la siguiente figura.

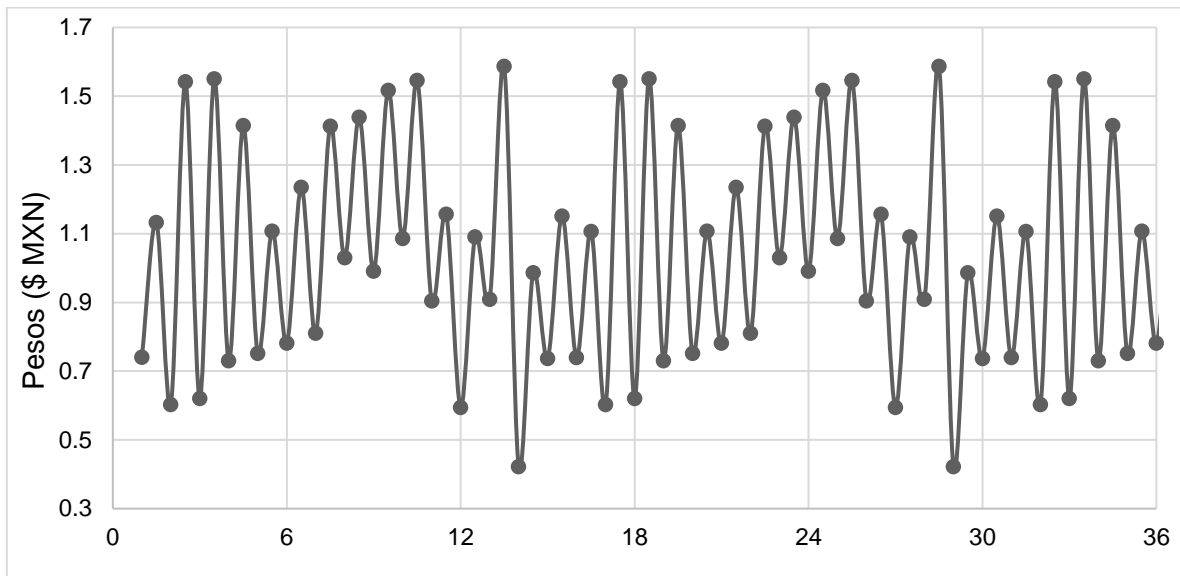
Figura 37. Tarifas de \$/kWh Baja California 2002-2020



Elaboración propia con datos de (Comisión Federal de Electricidad , 2020)

De acuerdo con la gráfica anterior se estiman las tarifas con las que contará el insumo en el tiempo de vida de los proyectos, siendo el tiempo máximo contemplado de 36 años para el caso de ORCR con estimulación, como se muestra en la Figura 38.

Figura 38. Estimación de tarifa energética en Baja California durante un periodo de 36 años.



Elaboración propia con datos de CFE

Impuestos

Los impuestos se toman en cuenta a partir de obtener una utilidad. Los impuestos que se deben de considerar son el ISR (Impuesto Sobre la Renta) el cual es del 35% de la utilidad bruta, e IEPS (Impuesto Especial sobre Producción y Servicios) por el uso de recurso geotérmico el cual corresponde al 13%. (Jensen Díaz, 2018)

4.1. Análisis de costos

Como se menciona en la primera hoja del capítulo, se tienen 3 casos, siendo dos con un tiempo de vida de proyecto de 30 años y el caso con estimulación de 36 años.

Para llevar a cabo el análisis se requiere de saber costos de inversión, los ingresos y egresos en el transcurso del proyecto. Para finalmente obtener el VAN, TIR y ROI.

Costos

Los siguientes costos son lo que se consideran como costos de inversión de acuerdo con una planta Ciclo Rankine Orgánico Regenerativo con una capacidad

instalada de 1 MW, conforme a los datos de los diferentes autores y con su respectiva escalación al 2020, con el valor promedio de cambio dólar-peso del 2020 siendo de \$21.70 MXN. Se considera solamente para el equipo del ORCR con un costo de \$3,000 USD y para la TE-01, además del costo por estimulación.

Tabla 10. Total de costos de inversión de plata geotermoeléctrica con capacidad instalada de 1MWe.

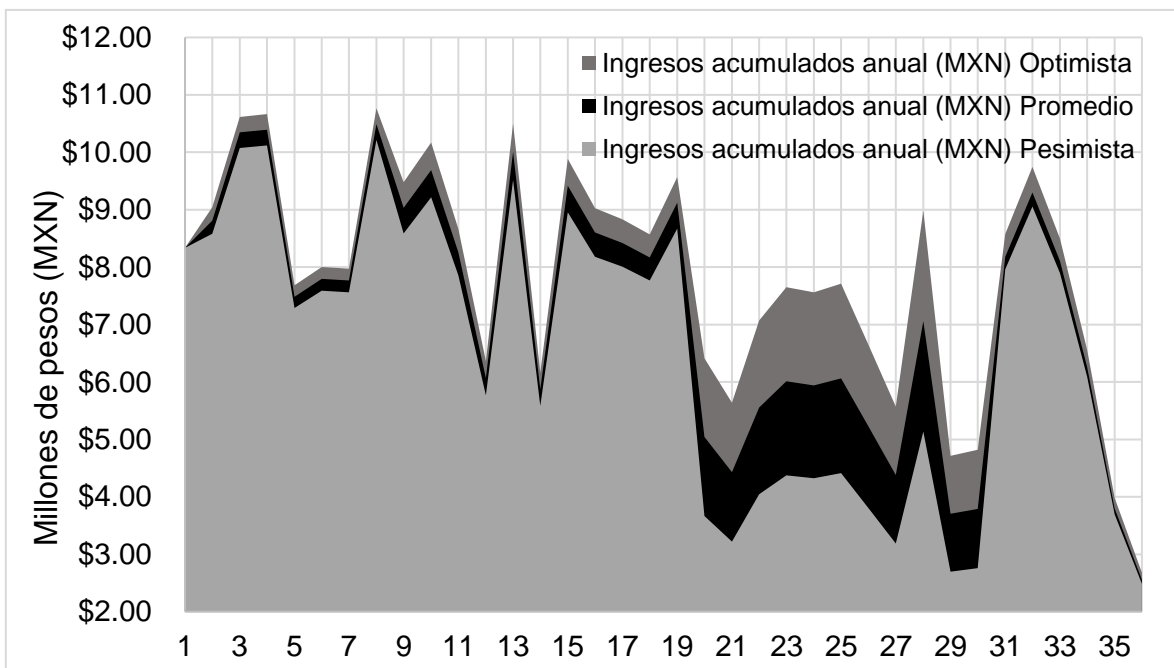
Descripción	\$ (MXN)
Construcción de planta (ciclo ORCR)	\$ 89,630,807.69
Torre de enfriamiento	\$ 1,792,616.15
Costo de estimulación	\$ 25,246,010.83

Elaboración propia con información de (Goldstein & Hiriart, 2011), (Hiriart Le Berth, 2011) y (Flores , Davies, Couples, & Palsson, 2005)

Ingresos

A partir de la estimación de la tarifa energética, se estiman los ingresos anuales por generación tomando en cuenta los escenarios que se presentan en el capítulo tercero (optimista, promedio y pesimista).

Figura 39. Ingresos acumulados anuales en tres escenarios



Elaboración propia

A partir de la anterior gráfica se tiene como máximo un ingreso por generación energética de más de 10 millones de pesos, asimismo se visualiza el descenso por el flujo del pozo y el incremento que se tiene a partir del año 30 debido a la estimulación ácida.

A continuación, a partir de los datos dados se analizan los indicadores de rentabilidad de los 3 casos en los 3 diferentes escenarios.

Egresos

Los egresos que se tienen son los costos por O&M el cual sería cada 2 años y medio, y por el uso de agua para suministro de la TE-01, del cual se tiene un costo variable.

4.2. Análisis económico

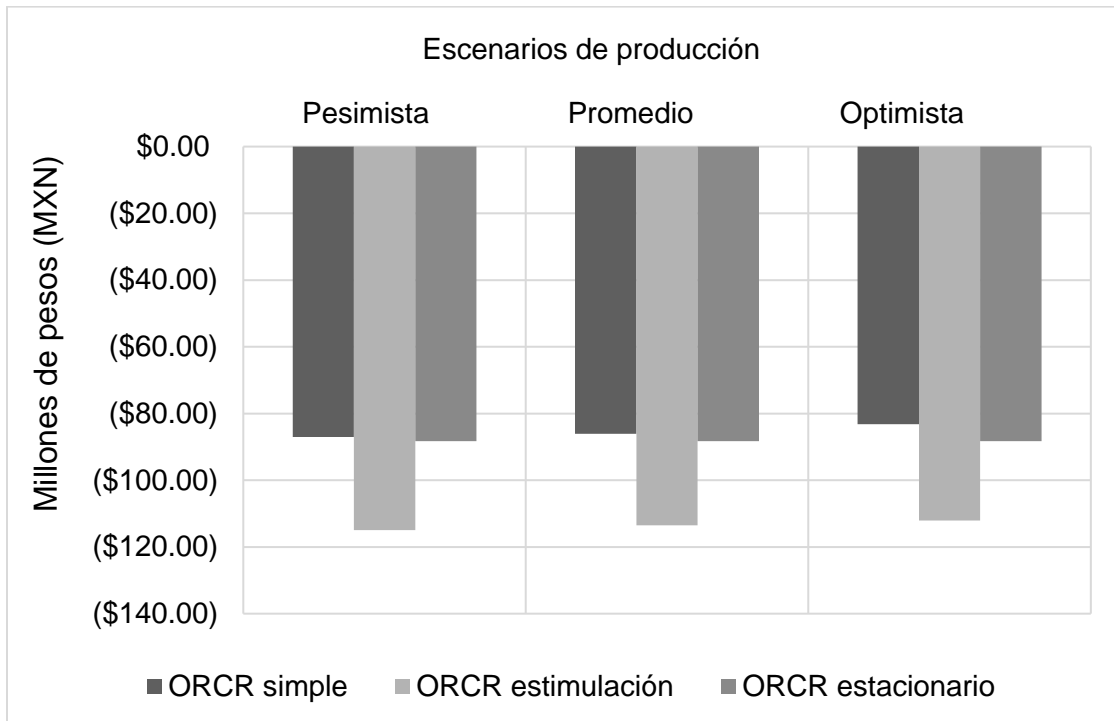
VAN (Valor Acumulado Neto)

Muestra en el presente el valor de los flujos de dinero. Por lo tanto, el VPN o VAN se pueden representar en tres tipos de resultados:

- $VPN > 0$ Indica que el proyecto es conveniente y que el dinero invertido rinde más que la tasa de interés.
- $VPN = 0$ Indica que el proyecto es indiferente y que el dinero invertido rinde exactamente que la tasa de interés.
- $VPN < 0$ Indica que el proyecto no es conveniente y que el dinero invertido rinde menos que la tasa de interés. (Segovia Aldape , 2010)

A continuación, se representa el VPN del proyecto por medio de la Figura 40, en el cual se estima con una tasa de descuento del 10%, en tres escenarios y en tres casos, el caso de estado estacionario es el mismo valor en los tres escenarios ya que no existe fluctuación en la producción del pozo, siendo así los ingresos y egresos iguales en los 30 años de vida del proyecto.

Figura 40. VPN del proyecto con una tasa de descuento del 10%



Elaboración propia

Al contemplar los tres escenarios de producción del pozo geotérmico para el análisis económico, se pueden denotar varios aspectos;

- El ORCR con estimulación tiene menor VPN en comparación al caso base y estacionario
- El costo por estimulación hace que tenga menor VPN el ORCR con estimulación

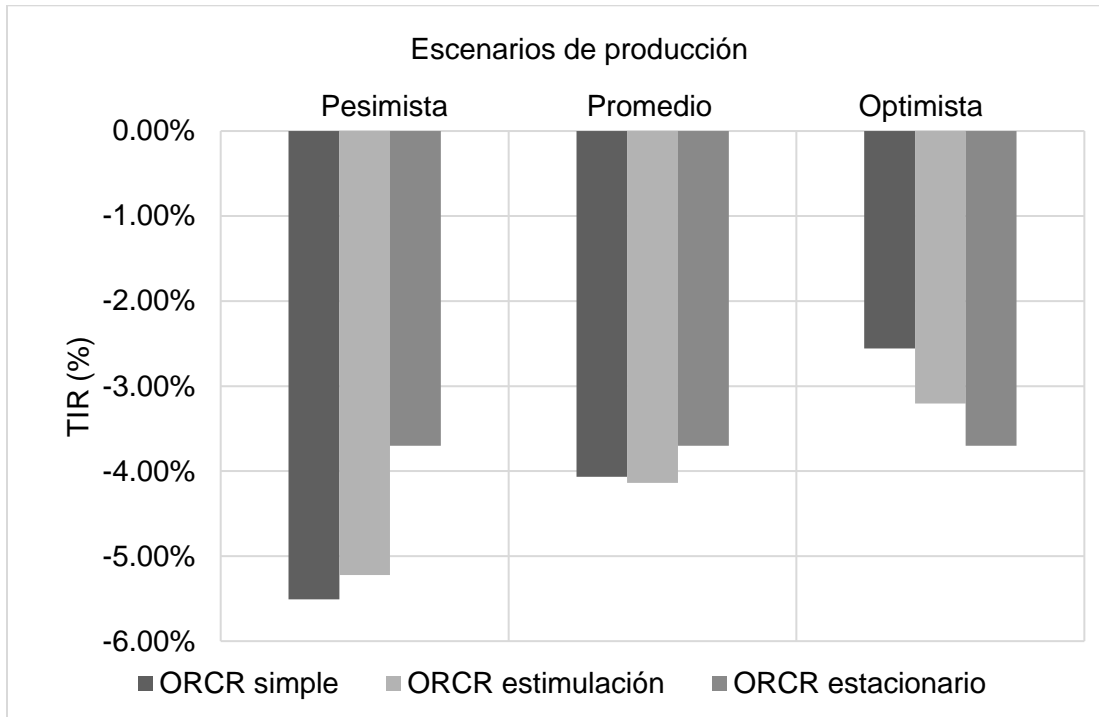
Sin embargo, en general al ser el $VPN < 0$ se considera que no es conveniente en ninguno de los escenarios el proyecto.

TIR (Tasa Interna de Retorno)

Representa la rentabilidad porcentual del proyecto considerando los flujos de dinero por año. Se le llama tasa interna de rendimiento, porque supone que el dinero que se gana año con año se reinvierte en su totalidad. Es decir, se trata de la tasa de

rendimiento generadas en su totalidad en el interior de la empresa por medio de la reinversión. (Baca Urbina, 2010)

Figura 43. Tasa Interna de Retorno (%).



Elaboración propia

Como en el caso anterior, en la obtención de la TIR se observa que:

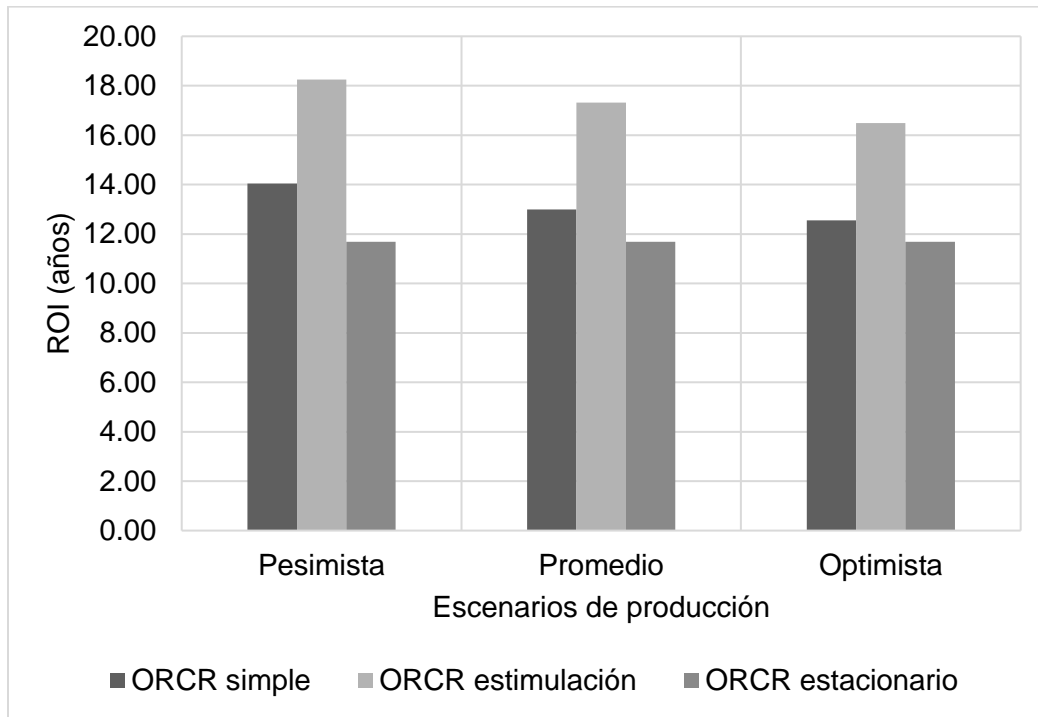
- La TIR tiene su mejor punto en escenario optimista y con ORC simple
- La TIR conforme se avanza en escenarios en el ORCR simple y con estimulación mejora, comparado al estado estacionario.

Al igual que el indicador anterior, sale negativo, lo que significa que no es viable económicamente el proyecto en ninguno de los escenarios.

ROI (Return of Investment,)

Se conoce el tiempo que se requiere para recuperar la inversión inicial neta, es decir, en que año los flujos de efectivo igualan el monto de la inversión inicial.^[48]

Figura 44. Periodo de retorno de inversión en años.



Elaboración propia

En la obtención del PRI se obtiene:

- Es mayor el tiempo de recuperación en el caso con estimulación ya que se suma el tiempo en que se recupera el costo por estimulación.
- En el caso base y estacionario, a pesar de que ambos cuentan con 30 años de vida del proceso y sin un costo de estimulación, se tiene un ROI más viable en estado estacionario en dos de los tres escenarios.

La estimación que se obtuvo de producción de recurso geotérmico dio como resultado un proyecto económicamente no viable ya que el VAN y TIR son negativos, el ROI resultante es muy alto considerando el tiempo de vida del proyecto, siendo el tiempo de recuperación de inversión cercano a la mitad del tiempo de vida del proyecto, y en el ORCR con estimulación incluso superando la mitad del tiempo de vida del proyecto.

CONCLUSIONES

Para el presente caso estudiado, en el cual se llevó a cabo la estimación de los perfiles de carga energéticos del pozo geotérmico por medio del Ciclo Rankine orgánico simple y regenerativo, el factor con mayor relevancia ha sido los perfiles de producción de recurso geotérmico, ya que de este depende la variación de generación energética y la viabilidad económica.

Por ello el análisis es tomando en cuenta la producción del pozo y sin considerarlo, ya que se tiene que visualizar un caso real (estado dinámico) y el caso que generalmente usan (estado estacionario), pudiendo así comparar económicamente los datos de ambos.

No obstante, la producción de un pozo no se puede estimar debido a que su comportamiento es único, todos tienen diferente producción, tiempo de vida, rapidez de decaimiento, además de existir demasiados factores que podrían afectar cuando ya se encuentra en uso el pozo y de los cuales algunos no se pueden pronosticar. Por ello la explotación de recursos geotérmicos para usos energéticos es incierto, ya que se sabe de los perfiles de producción hasta que se hace uso de este.

La estimación que se obtuvo de producción de recurso geotérmico dio como resultado un proyecto económicamente no viable. A pesar de hacer uso del último recurso que se tiene para continuar con la explotación de un pozo geotérmico como lo es la estimulación.

Sin embargo, se ha visto que la viabilidad económica y de producción energética está relacionada con la producción del pozo, por ello es importante destacar que el caso de estudio resultó no beneficioso.

En conclusión, la estimación del comportamiento para el ORCR a pesar de haberse basado en el comportamiento de un pozo y estimulación real, por la baja entalpía que presenta no fue viable económicamente, además de los altos costos que se obtuvieron de equipo y agua potable de uso industrial.

Podría mencionar de una manera muy particular que ese sea el motivo por el cual solo se buscan pozos de alto gradiente térmico y que solo a ellos mismos se les practique la estimulación, porque a pesar de que es incierto el tiempo de vida y el comportamiento productivo es aquel que va a dar mayores utilidades en los menores tiempos, que los pozos de bajo gradiente térmico. O que la utilización de ciclos de potencia como el ORC sean utilizados mayormente para recurso geotérmico despreciado de otro tipo de plantas como las de doble Flash.

REFERENCIAS

1. A. Cengel, Y., & A. Boles, M. (2011). *Termodinámica* (Septima ed.). Mc Graw Hill.
2. Aguilar Dumas, Á. (2010). *Situación actual y alternativas de exploración en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC*. Comisión Federal de Electricidad . Recuperado el febrero de 2019, de <http://132.248.9.34/hevila/Geotermia/2010/vol23/no2/4.pdf>
3. Aragón Aguilar, A., & Izquierdo Montalvo, G. (2011). Determinación de daño en pozos geotérmicos a partir de sus pruebas de producción. *Boletín del instituto de investigaciones eléctricas*. Recuperado el marzo de 2019, de <https://www.ineel.mx/boletin012011/tecni.pdf>
4. Arellano Gómez, V., Iglesias Rodríguez, E., & García Gutiérrez, A. (2008). La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura. *Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas*, 102-114. Obtenido de Instituto de Investigaciones Eléctricas.
5. Baca Urbina, G. (2010). *Evaluación de proyectos* (Sexta edición ed.). México: McGraw Hill.
6. Bahman, Z. (septiembre de 2017). Heat exchanger types and classifications. (ResearchGate, Recopilador) Nuevo Mexico. Recuperado el junio de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/308464270_Heat_Exchanger_Types_and_Classifications
7. Beltrán Rodríguez, L. (2018). *Reporte de avance de energías limpias primer semestre 2018*. Secretaria de energía, Energías limpias, México. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/418391/RAEL_Primer_Semestre_2018.pdf
8. Bertani, R. (19-25 de 04 de 2015). Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress*. Recuperado el 26 de 09 de 2019, de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/01001.pdf>
9. Bianchi, M., & Branchini, L. (2018). *Performance and operation of micro-ORC energy system using geothermal heat source*. (ScienceDirect, Recopilador) Italia . Recuperado el febrero de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218303928#!>
10. BRM, & Peerless pump. (s.f.). Bombas verticales sumergibles tipo turbina. Nuevo León. Recuperado el noviembre de 2019, de <http://brmsp.mx/bombas-sumergibles-verticales.php>
11. CeMIEGeo. (2017). *Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica*. Recuperado el agosto de 2019, de <http://cemiegeo.org/index.php/cursosDue?id=84>
12. Chapa H., F. (1967). *Corrosión e incrustación en tuberías*. Monterrey. Recuperado el octubre de 2019, de <http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1020082527/1020082527.PDF>
13. Chejne Janna, F. (2015). *Recuperación de energía en procesos industriales*. Medellín, Colombia : Universidad Nacional de Colombia .

14. *Comisión Federal de Electricidad* . (2020). Obtenido de https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_industria.asp
15. Dickes, R. (2013). Design and fabrication of a variable wall thickness two-stage scroll expander to be integrated in a micro-solar power plant . Belgica . Recuperado el Octubre de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/267324790_Design_and_fabrication_of_a_variable_wall_thickness_two-stage_scroll_expander_to_be_integrated_in_a_micro-solar_power_plant
16. Dickson, M., & Fanelli, M. (2005). *Geothermal energy: utilization and technology*. New York : UNESCO. Recuperado el 20 de 09 de 2019
17. Energía, A. I. (06 de 10 de 2019). *Banco mundial*. Obtenido de Energía Sostenible para Todos: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.RNEW.ZS?end=2015&start=1990&view=chart>
18. Enertime. (s.f.). *Enertime*. Recuperado el diciembre de 2019, de Clean energy harvesting: <https://www.enertime.com/es/tecnologia/soluciones/turbinas-orc>
19. Fernandez Díez, P. (s.f.). *Bombas centrifugas y volumetricas*. Universidad de cantabria , Departamento de ingeniería eléctrica y energetica . Recuperado el junio de 2019, de http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/bombas-centrifugas-y-volumetricas.pdf
20. Flores , M., Davies, D., Couples, G., & Palsson, B. (2005). Proceedings world geothermal congress 2005. *Stimulation of geothermal wells, , Can we afford it?* México. Recuperado el enero de 2020, de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2005/1028.pdf>
21. Gallup, D. (2009). Production engineering in geothermal technology: A review. *ScienceDirect*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650509000212>
22. Goldstein, B., & Hiriart, G. (2011). Geothermal Energy . *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* . IPCC. New York, USA. Recuperado el Diciembre de 2019, de <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/Chapter-4-Geothermal-Energy-1.pdf>
23. Hiriart Le Bert, G. (2011). *Informe para el Banco interamericano de desarrollo y la comisión reguladora de energia* . México. Recuperado el febrero de 2019, de <http://www.cre.gob.mx/documento/2026.pdf>
24. Hiriart Le Berth, G. (Mayo de 2011). Programa de asistencia técnica en energía renovable en México del Banco Mundial. *Tecnologías de punta y costos asociados para generación distribuida , autoabastecimiento y cogeneración con recursos geotérmicos en México*. México. Obtenido de <http://oel.mx/OEL/data/files/docs/125.TecnologiasDePuntaYCostos.pdf>
25. HVC&A, M. (2014). *Revista en linea Mundo HVC&A*. Obtenido de <https://www.mundohvacr.com.mx/wp-content/uploads/2014/10/A0MH0076480.pdf>

26. Izquierdo Montalvo , G., & Flores Armenta , M. (2012). Estudio experimental del comportamiento de las rocas del yacimiento de Los Humeros, México, ante soluciones ácidas. *Revista mexicana de geoenergía* , 25(1). Recuperado el septiembre de 2019, de <http://pubs.geothermal-library.org/lib/journals/Geothermia-Vol25-1.pdf>
27. Jaramillo, O. A. (2007). *Intercambiadores de calor*. Universidad Nacional Autonoma de México, Centro de investigación de energía, México. Obtenido de <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/Intercambiadores.pdf>
28. Jensen Díaz, W. (mayo de 2018). Nueva era de la energía en México. *Oportunidades de inversión crecientes de fundamentos institucionales al enfoque eléctrico*. México. Recuperado el 2020, de https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user_upload/mexico/media_elements/reports/NuevaEraEnergiaMexico_ESP.pdf
29. Maya Gónzales , R., & Gutiérrez Negrín , L. (10 de diciembre de 2007). Recursos geotérmicos para generar electricidad en México. *Revista Digital Universitaria*, 8(12), 1-13. Obtenido de http://www.revista.unam.mx/vol.8/num12/art91/dic_art91.pdf
30. Montejano Bermudez , R. (2010). *Análisis técnico-económico de recuperación de energía residual en una planta geotérmica mediante un ciclo Rankine orgánico*.
31. Morales Cardenas , R., & Rodríguez Rodríguez, M. (2016). *Recuperación de vapor en 12 pozos productores mediante estimulación acida en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC*. . Comisión Federal de Electricidad , Gerencia de proyectos geotermoeléctricos, Morelia. Recuperado el diciembre de 2019, de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/Mexico/2016/25-CFE-MarcoHelio-Final.pdf>
32. Morales Castro , A. (s.f.). Administración de proyectos de inversión. *Apunte electrónico* . México, México. Recuperado el diciembre de 2019, de http://fcasua.contad.unam.mx/apuntes/interiores/docs/20172/administracion/8/LA_182_5_13067_A_Admon_proyectos_invers.pdf
33. Nemati, A., & Hossein, N. (Marzo de 2017). Case studies in thermal engineering. *A comparative thermodynamic analysis of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery: A case study for CGAM cogeneration system*. (Sciencedirect, Recopilador) Recuperado el octubre de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X16300673>
34. ONU. (2016). *Día Internacional de la Preservación de la capa de ozono, 16 de septiembre*. Obtenido de <https://www.un.org/es/events/ozoneday/background.shtml>
35. Ortúzar, F. (2016). *Controlando los contaminantes climáticos de vida corta*. Asociación Interamericana para la defensa del ambiente (AIDA). Recuperado el Junio de 2019, de https://www.aida-americas.org/sites/default/files/featured_pubs/reporte_ccvc_1.pdf
36. Pacheco Ibarra , J. (enero de 2019). CEMIEGEO. *Evaluación de tecnologías para la maximización de extracción de energía de yacimientos geotérmicos de mediana y baja entalpia* . Michoacán. Recuperado el diciembre de 2019, de

<http://cemiegeo.org/index.php/proyectos/desarrollos-tecnologicos-para-explotacion/p31/9-linea-de-investigacion/proyecto/36-p31>

37. Pump tech. (s.f.). Bomba vertical tipo turbina. Nuevo León. Recuperado el agosto de 2019, de <http://www.pumptech.com.mx/bomba-vertical-tipo-turbina-peerless.htm>
38. Quoilin , S. (2013). *Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems*. Recuperado el noviembre de 2019, de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000592#!>
39. Ramírez Montes , M., & Morales Alcalá, L. (2012). Primera estimulación ácida en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. *Revista mexicana de geotermia*, 25(2), 8. Recuperado el abril de 2019, de <http://132.248.9.34/hevila/Geotermia/2012/vol25/no2/6.pdf>
40. Rosyid, H. (2010). Sensitivity analysis of steam power plant-binary cycle. (ScienceDirect, Recopilador) Indonesia . Recuperado el diciembre de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544210002458?via%3Dihub#!>
41. Ruiz Casanova, E., & Soto Sánchez , A. (2017). Use of supercritical CO2 heated with geothermal energy for power production through direct expansion and heat supply to an ORC. U.S.A. Recuperado el 03 de agosto de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/321228286_IMECE2017-72005_USE_OF_SUPERCRITICAL_CO2_HEATED_WITH_GEO_THERMAL_ENERGY_FOR_POWER_PRODUCTION_THROUGH_DIRECT_EXPANSION_AND_HEAT_SUPPLY_TO_AN_ORC_CYCLE
42. Santoyo Gutiérrez , E., & Torres Alvarado, I. (Octubre de 2010). Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: Hacia un desarrollo sustentable. *Revista digital universitaria*, 11(10), 26. Obtenido de <http://www.revista.unam.mx/vol.11/num10/art95/art95.pdf>
43. Santoyo, E., & Barragan Reyes, R. M. (2010). Energías alternativas. *Academia Mexicana de Ciencias*, 40-51.
44. Segovia Aldape , J. (2010). Medición de la rentabilidad del efecto cambiario en un portafolio de inversión. *XV congreso internacional de contaduría administración e informática*. México. Recuperado el febrero de 2020, de <http://congreso.investiga.fca.unam.mx/docs/xv/docs/161.pdf>
45. SEMARNAT. (2007). Proyecto geotermoeléctrico Cerro Prieto V. *Manifestación de impacto ambiental , modalidad particular*. Recuperado el septiembre de 2019, de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2007/02BC2007E0001.pdf>
46. SENER. (2018). *Sistema de Información energética* . Recuperado el mayo de 2019, de Balance Nacional de Energía: Indicadores economicos y energeticos : <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvequa=IE0C01>
47. SENER. (2019). *Sistema de Información Energetica*. Recuperado el enero de 2020, de Evolución de la capacidad instalada por tipo de tecnología:

http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=DIPS_SE_C33_ESP

48. *SITAP*. (2018). Obtenido de Sistemas de Información de Tarifas de Agua Potable: <http://187.189.183.90/usoidustrial.php>
49. Thurairaja, K. (2019). Working fluid selection and performance evaluation of ORC. *Scimedirect*. Recuperado el Mayo de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218310968#!>
50. Torres Rodriguez, V., Arellano Gómez, V., & Santoyo Gutierrez, E. (1993). *Geotermia en México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Programa universitario de Energía.
51. Viejo Zubicaray, M. (2000). *Bombas; Teoría, diseño y aplicaciones*. Limusa. Recuperado el Agosto de 2019, de https://www.academia.edu/11976796/Bombas_Teor%C3%ADa_Dise%C3%B1o_y_Aplicaciones_-_Manuel_Viejo_Zubicaray
52. Wang, H., & Hongguang, Z. (septiembre de 2015). Parametric optimization of Regeneratrive Organic Rankine Cycle system for Diesel engine based on particle swarm optimization. Beijing, China. Recuperado el octubre de 2019, de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.893.8345&rep=rep1&type=pdf>
53. Wen Tien, T. (julio de 2005). An overview of environmental hazard and exposure risk of hydrofluorocarbons (HFCs). (Scimedirect, Recopilador) Taiwan. Recuperado el septiembre de 2019, de <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POP12FU-SUBM-PFOA-Canada-20-20161209.En.pdf>

ANEXOS

ANEXO A. MODELADO EN EES DEL ORCR

CICLO RANKINE ORGÁNICO CON REGENERACIÓN A PARTIR
DEL SISTEMA GEOTÉRMICO DE BAJA/MEDIA ENTALPIA

DATOS DE POZO

Profundidad=500_m

$\dot{m}_{\text{pozo}}=30_{\text{kg/s}}$

$\dot{m}_{\text{AG}} = \dot{m}_{\text{pozo}}$

$C_{\text{PAG@T,entrada}} = 0.0035 \cdot T_5 + 3.9484$

$\rho_{\text{AG,T5}} = 0.0069 \cdot T_5^2 - 2.9371 \cdot T_5 + 1186.7 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

FLUIDO DE TRABAJO R245fa

$PC = P_{\text{Crit}} (\text{R245fa})$

$TC = T_{\text{Crit}} (\text{R245fa})$

$C_{\text{PR245fa@Psat}} = C_{\text{p}} (\text{R245fa}, T = T_{1,\text{R245fa}}, P = P_{1,\text{R245fa}})$

DATOS PARA EL SISTEMA GEOTERMICO

Agua geotérmica

Entrada al OCR

$T_5=110_{\text{C}}$ $T_{1,\text{AG}} = \text{ConvertTemp} (\text{C}, \text{K}, T_5)$

$T_6=70_{\text{C}}$ $T_{2,\text{AG}} = \text{ConvertTemp} (\text{C}, \text{K}, T_6)$

DATOS PARA EL SISTEMA OCR

$P_{\text{min}}=200 \text{ [kPa]}$

$P_{\text{media}}= 900_{\text{kPa}}$

$P_{\text{max}}=1500 \text{ [kPa]}$

$T_{\text{sat2}} = T_{\text{sat}} (\text{R245fa}, P = P_{\text{max}})$

$T_{2,\text{R245fa}}=381 \text{ [K]}$

Balances de masa del OCR

$\dot{m}_{2,\text{R245fa}} = \dot{m}_{1,\text{R245fa}}$

$\dot{m}_{12,\text{R245fa}} = \dot{m}_{1,\text{R245fa}}$

$\dot{m}_{3,\text{R245fa}} = \dot{m}_{11,\text{R245fa}}$

$\dot{m}_{4,\text{R245fa}} = \dot{m}_{11,\text{R245fa}}$

$\dot{m}_{5,\text{R245fa}} = \dot{m}_{11,\text{R245fa}}$

$\dot{E}_{\text{AG}} = \dot{m}_{\text{AG}} \cdot C_{\text{PAG@T,entrada}} \cdot (T_{1,\text{AG}} - T_{2,\text{AG}})$ Energía cedida de agua geotérmica

GENERADOR DE VAPOR

Refrigerante

$$T_{1,R245fa} = T_{1,real,02}$$

$$T_1 = \text{ConvertTemp} (K, C, T_{1,R245fa})$$

$$P_{sat,R245fa} = P_{sat} (R245fa, T = T_{1,R245fa})$$

$$P_{1,R245fa} = P_{max}$$

$$P_{2,R245fa} = P_{1,R245fa}$$

$$h_2 = h (R245fa, T = T_{2,R245fa}, P = P_{2,R245fa})$$

$$s_2 = s (R245fa, T = T_{2,R245fa}, P = P_{2,R245fa})$$

$$T_2 = \text{ConvertTemp} (K, C, T_{2,R245fa})$$

Balance de energía del GV

Efectividad de GV

Eta_{GV}=1

$$\eta_{GV} = \frac{\dot{E}_{GV}}{\dot{E}_{AG}}$$

$$\dot{E}_{GV} = \dot{m}_{1,R245fa} \cdot (h_2 - h_{1,r,02})$$

$$A = \dot{m}_{1,R245fa} \cdot (h_2 - h_{1,r,02})$$

$$\dot{E}_{AG} = \dot{E}_{GV} + Q_{perdido,GV}$$

CONDENSADOR

$$P_{4,R245fa} = P_{min}$$

$$x_4 = 0$$

$$T_{4,R245fa} = T (R245fa, P = P_{4,R245fa}, x = x_4)$$

$$T_4 = \text{ConvertTemp} (K, C, T_{4,R245fa})$$

$$h_4 = h (R245fa, x = x_4, P = P_{4,R245fa})$$

$$s_4 = s (R245fa, P = P_{4,R245fa}, x = x_4)$$

$$\dot{E}_{Cond} = \dot{m}_{3,R245fa} \cdot ((1 - y_{10}) \cdot (h_3 - h_4))$$

$$\dot{E}_{Cond,idea} = \dot{m}_{3,R245fa} \cdot (h_3 - h_4)$$

$$\eta_{Cond} = 0.9$$

$$\eta_{Cond} = \frac{\dot{E}_{Cond,r}}{\dot{E}_{Cond,idea}}$$

$$v = v (R245fa, P = P_{4,R245fa}, x = x_4)$$

BOMBA BAR-01

$$\text{Conversión}_{1,\text{kPa},\text{m}^3} = 1 \text{ [kJ]}$$

$$W_{\text{bomba},1,\text{entrada}} = V \cdot (P_{\text{media}} - P_{\text{min}}) \cdot \frac{\text{Conversión}_{1,\text{kPa},\text{m}^3}}{1}$$

$$P_{11,\text{R245fa}} = P_{\text{media}}$$

$$S_4 = S_{11i}$$

$$h_{11i} = h(\text{R245fa}, S = S_{11i}, P = P_{11,\text{R245fa}})$$

$$X_{11i} = x(\text{R245fa}, P = P_{11,\text{R245fa}}, S = S_{11i})$$

$$\text{Eta}_{\text{BAORC}} = 0.94$$

$$\dot{W}_{\text{Bomba},1,\text{ent},i} = \dot{m}_{4,\text{R245fa}} \cdot (h_{11i} - h_4)$$

$$\eta_{\text{BAORC}} = \frac{\dot{W}_{\text{Bomba},1,\text{ent},i}}{\dot{W}_{\text{EACRC}}}$$

$$\dot{m}_{4,\text{R245fa}} \cdot h_4 + \dot{W}_{\text{EACRC}} = \dot{m}_{11,\text{R245fa}} \cdot h_{11,r}$$

$$S_{11r} = s(\text{R245fa}, h = h_{11,r}, P = P_{4,\text{R245fa}})$$

$$T_{11,\text{R245fa}} = T(\text{R245fa}, h = h_{11,r}, S = S_{11r})$$

$$T_{11} = \text{ConvertTemp}(K, C, T_{11,\text{R245fa}})$$

BOMBA BAR-02

Datos antes de entrada a la bomba

$$P_{12,\text{R245fa}} = P_{\text{media}}$$

$$X_{12} = 0$$

$$S_{12} = s(\text{R245fa}, P = P_{12,\text{R245fa}}, X = X_{12})$$

$$S_{12} = S_{1i,02}$$

$$h_{12} = h(\text{R245fa}, X = X_{12}, P = P_{12,\text{R245fa}})$$

$$h_{1i,02} = h(\text{R245fa}, P = P_{1,\text{R245fa}}, S = S_{1i,02})$$

$$T_{1i,02} = T(\text{R245fa}, h = h_{1i,02}, S = S_{1i,02})$$

$$\text{Eta}_{\text{BAORC},02} = 0.85$$

$$\dot{W}_{\text{EACRC},i,02} = \dot{m}_{1,\text{R245fa}} \cdot (h_{1i,02} - h_{12})$$

$$\eta_{\text{BAORC},02} = \frac{\dot{W}_{\text{EACRC},i,02}}{\dot{W}_{\text{EACRC},02}}$$

$$\dot{m}_{12,\text{R245fa}} \cdot h_{12} + \dot{W}_{\text{EACRC},02} = \dot{m}_{1,\text{R245fa}} \cdot h_{1,r,02}$$

Se dio el $h_{1,r,02}$ para despues hacer la igualdad $h_{1,r,02}=h_{1,R245fa}$

$$s_{1r,02} = s (R245fa , h = h_{1,r,02}, P = P_{12,R245fa})$$

$$T_{1,real,02} = T (R245fa , h = h_{1,r,02}, s = s_{1r,02})$$

$$T_{12,R245fa} = T (R245fa , P = P_{12,R245fa} , X = X_{12})$$

$$T_{12} = \text{ConvertTemp} (K , C , T_{12,R245fa})$$

$$\dot{W}_{BCMEA,ENTRADA} = (1 - y_{10}) \cdot \dot{W}_{EACRC} + \dot{W}_{EACRC,02}$$

REGENERADOR

$$\dot{m}_{12,R245fa} \cdot h_{12} = (\dot{m}_{12,R245fa} - \dot{m}_{11,R245fa}) \cdot h_{10} + \dot{m}_{11,R245fa} \cdot h_{11,r}$$

$$\dot{m}_{10,R245fa} = \dot{m}_{12,R245fa} - \dot{m}_{11,R245fa}$$

$$y_{10} = \frac{\dot{m}_{10,R245fa}}{\dot{m}_{12,R245fa}}$$

TURBINA DE VAPOR -TV-01-

$$s_2 = s_{10i}$$

$$P_{10,R245fa} = P_{media}$$

$$h_{10i} = h (R245fa , P = P_{10,R245fa} , s = s_{10i})$$

$$x_{10i} = x (R245fa , P = P_{10,R245fa} , h = h_{10i})$$

$$\dot{W}_{TV,1i} = \dot{m}_{10,R245fa} \cdot (h_2 - h_{10i})$$

$$T_{10i} = T (R245fa , h = h_{10i} , s = s_{10i})$$

$$\eta_{TV,1} = 0.93$$

$$\eta_{TV,1} = \frac{\dot{W}_{TV,1}}{\dot{W}_{TV,1i}}$$

$$\dot{m}_{10,R245fa} \cdot h_2 = \dot{m}_{10,R245fa} \cdot h_{10} + \dot{W}_{TV,1}$$

$$s_{10} = s (R245fa , h = h_{10} , P = P_{10,R245fa})$$

$$T_{10,R245fa} = T (R245fa , h = h_{10} , s = s_{10})$$

$$T_{10} = \text{ConvertTemp} (K , C , T_{10,R245fa})$$

$$x_{10} = x (R245fa , P = P_{10,R245fa} , h = h_{10})$$

$$T_{sat10} = T_{sat} (R245fa , P = P_{10,R245fa})$$

$$W_{10,fv} = (\dot{m}_{2,R245fa} - \dot{m}_{10,R245fa}) \cdot (h_2 - h_{10})$$

TURBINA DE VAPOR -TV-02-

$$s_2 = s_{3i}$$

$$P_{3,R245fa} = P_{min}$$

$$h_{3i} = h (R245fa , P = P_{3,R245fa} , s = s_{3i})$$

$$x_{3i} = x (R245fa , P = P_{3,R245fa} , h = h_{3i})$$

$$T_{3i} = T(R245fa, h = h_{3i}, s = s_{3i})$$

$$\dot{W}_{TV,2i} = \dot{m}_{3,R245fa} \cdot (h_2 - h_{3i})$$

$$\eta_{TV} = 1$$

$$\eta_{TV} = \frac{\dot{W}_{TV,2}}{\dot{W}_{TV,2i}}$$

$$\dot{m}_{3,R245fa} \cdot h_2 = \dot{m}_{3,R245fa} \cdot h_3 + \dot{W}_{TV,2}$$

$$s_3 = s(R245fa, h = h_3, P = P_{3,R245fa})$$

$$T_{3,R245fa} = T(R245fa, h = h_3, s = s_3)$$

$$T_3 = \text{ConvertTemp}(K, C, T_{3,R245fa})$$

$$x_3 = x(R245fa, P = P_{3,R245fa}, h = h_3)$$

$$T_{sat3} = T_{sat}(R245fa, P = P_{3,R245fa})$$

$$\dot{W}_{TV,Ti} = \dot{W}_{TV,1i} + \dot{W}_{TV,2i}$$

$$\dot{W}_{TV,T} = \dot{W}_{TV,1} + \dot{W}_{TV,2}$$

CICLO RANKINE ORGANICO

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{m}_{1,R245fa} \cdot (h_2 - h_{1,r,02})$$

$$\eta_{OCR,ind} = \left[1 - \left(\frac{\dot{E}_{Cond} + Q_{perdido,GV}}{\dot{E}_{AG}} \right) \right] \cdot \eta_{GElect}$$

$$\eta_{GElect} = 0.985$$

$$\eta_{BElect} = 0.98$$

$$W_{electrica,OCR} = \dot{W}_{TV,T} \cdot \eta_{GElect}$$

$$W_{electrica,OCR,2} = \frac{\dot{W}_{TV,T}}{\eta_{GElect}}$$

$$W_{neto,OCR,sets} = \dot{W}_{TV,T} - \dot{W}_{EAORC} - \dot{W}_{EAORC,02} - \dot{W}_{TE} - \dot{W}_{BFE} - \dot{W}_{EAT}$$

$$W_{neto,OCR} = W_{electrica,OCR} - \frac{\dot{W}_{EAORC}}{\eta_{BElect}} - \frac{\dot{W}_{EAORC,02}}{\eta_{BElect}} - \frac{\dot{W}_{TE}}{\eta_{BElect}} - \frac{\dot{W}_{BFE}}{\eta_{BElect}} - \frac{\dot{W}_{EAT}}{\eta_{BElect}}$$

$$W_{neto,OCR} - g_{e0} = 1$$

$$W_{neto} = \frac{W_{neto,OCR}}{1000}$$

Con una producción al 75%; el cual es la producción habitual en las plantas geotermicas

$$GWh_{año} = \frac{W_{neto}}{1000} \cdot 24 \cdot 365 \cdot 0.75 \quad \text{Generación bruta anual ideal}$$

$$\eta_{OCR,dir} = \frac{W_{neto,OCR}}{\dot{E}_{AG}}$$

$$\eta_{ORC} = \eta_{OCR,dir} \cdot 100 \quad [\%]$$

Balance global de OCR

$$\dot{E}_{AG} - W_{neto,OCR} = \dot{E}_{perdida}$$

DIAGRAMA T-s

$$T_1 = T_{10,R245fa} \quad P_1 = P_{10,R245fa}$$

$$h_1 = h(R245fa, T = T_1, P = P_1) \quad s_1 = s(R245fa, T = T_1, P = P_1)$$

$$T_2 = T_{3,R245fa} \quad P_2 = P_{3,R245fa}$$

$$h_2 = h(R245fa, T = T_2, P = P_2) \quad s_2 = s(R245fa, T = T_2, P = P_2)$$

$$T_3 = T_{4,R245fa} \quad x_3 = 1$$

$$h_3 = h(R245fa, x = x_3, T = T_3) \quad s_3 = s(R245fa, x = x_3, T = T_3) \quad \text{De vap.sobrecalentado a vap.sat (3')}$$

$$T_4 = T_{4,R245fa} \quad P_4 = P_{4,R245fa} + 0.001$$

$$h_4 = h(R245fa, T = T_4, P = P_4) \quad s_4 = s(R245fa, T = T_4, P = P_4)$$

$$T_5 = T_{11,R245fa} \quad x_5 = 0$$

$$h_5 = h(R245fa, x = x_5, T = T_5) \quad s_5 = s(R245fa, x = x_5, T = T_5)$$

$$T_6 = T_{12,R245fa} \quad P_6 = P_{12,R245fa} + 0.001$$

$$h_6 = h(R245fa, T = T_6, P = P_6) \quad s_6 = s(R245fa, T = T_6, P = P_6)$$

$$T_7 = T_{12,R245fa} \quad x_7 = 1$$

$$h_7 = h(R245fa, x = x_7, T = T_7) \quad s_7 = s(R245fa, x = x_7, T = T_7) \quad \text{De vap.sobrecalentado a vap.sat (10')}$$

$$T_8 = T_{10,R245fa} \quad P_8 = P_{10,R245fa}$$

$$h_8 = h(R245fa, T = T_8, P = P_8) \quad s_8 = s(R245fa, T = T_8, P = P_8)$$

$$T_9 = T_{2,R245fa} \quad P_9 = P_{2,R245fa}$$

$$h_9 = h(R245fa, T = T_9, P = P_9) \quad s_9 = s(R245fa, T = T_9, P = P_9)$$

$$T_{10} = T_{2,R245fa} \quad x_{10} = 0$$

$$h_{10} = h(R245fa, x = x_{10}, T = T_{10}) \quad s_{10} = s(R245fa, x = x_{10}, T = T_{10}) \quad \text{Cambio liq.sat a vap.sat (1')}$$

$$T_{11} = T_{1,R245fa} \quad P_{11} = P_{1,R245fa}$$

$$h_{11} = h(R245fa, T = T_{11}, P = P_{11}) \quad s_{11} = s(R245fa, T = T_{11}, P = P_{11})$$

Carta psicometrica

$$T_{DB,1} = T_{BS}$$

$$W_1 = \omega_1$$

$$\text{Weltbulb}_1 = T_{BH}$$

TORRE DE ENFRIAMIENTO TE-01

$$T_7 = T_{BH,prom} + 5 \quad T_{7,AE} = \text{ConvertTemp}(C, K, T_7)$$

$$P_{succión,TE} = 101.325 \quad [\text{kPa}]$$

$$P_{descarga,TE} = P_{min}$$

$$Cp_{AE} = Cp(\text{water}, T = T_{7,AE}, P = P_{succión,TE})$$

$$Cp_{Aire} = Cp(\text{AIRH2O}, T = T_{7,AE}, W = \omega_1, P = P_{atm})$$

$$\text{Eta}_{TE} = 0.67$$

$$\eta_{TE} = \frac{T_{8,AE} - T_{7,AE}}{T_{8,AE} - T_{BH}}$$

$$T_8 = \text{ConvertTemp} (K, C, T_{8,AE})$$

$$\dot{E}_{Ccond} = \dot{m}_{7,AE} \cdot Cp_{AE} \cdot (T_{8,AE} - T_{7,AE})$$

$$\dot{m}_{7,AE} = \dot{m}_{8,AE}$$

$$h_{AE,s} = h (\text{water}, T = T_{7,AE}, P = P_{succión,TE})$$

$$h_{AE,e} = h (\text{water}, T = T_{8,AE}, P = P_{descarga,TE})$$

$$v_{AE} = v (\text{water}, T = T_{7,AE}, P = P_{atm})$$

$$\dot{V}_{AE} = \dot{m}_{7,AE} \cdot v_{AE}$$

Datos de aire de TE-01

$$T_{BH,prom}=20.9C \quad T_{BH} = \text{ConvertTemp} (C, K, T_{BH,prom})$$

$$P_{atm}=101.325kPa$$

$$RH=0.64$$

$$T_{BS} = T (\text{AIRH2O}, B = T_{BH}, P = P_{atm}, R = RH) \quad T_{BS,1} = \text{ConvertTemp} (K, C, T_{BS})$$

$$h_{AR,1} = h (\text{AIRH2O}, T = T_{BS}, P = P_{atm}, R = RH)$$

$$v_{TE} = v (\text{AIRH2O}, T = T_{BS}, P = P_{atm}, R = RH)$$

$$T_{dp} = DP (\text{AIRH2O}, T = T_{BS}, P = P_{atm}, R = RH) \quad T_{dp,1} = \text{ConvertTemp} (K, C, T_{dp})$$

$$\omega_1 = \omega (\text{AIRH2O}, B = T_{BH}, P = P_{atm}, R = RH)$$

$$RH_2=0.99$$

$$T_{AR,2} = T_8 - T_7 + T_{BH} \quad T_{AR} = \text{ConvertTemp} (K, C, T_{AR,2})$$

$$T_{BS,2} = T (\text{AIRH2O}, B = T_{AR,2}, P = P_{atm}, R = RH) \quad T_{BS,3} = \text{ConvertTemp} (K, C, T_{BS})$$

$$h_{AR,2} = h (\text{AIRH2O}, T = T_{BS,2}, R = RH_2, P = P_{atm})$$

$$\omega_2 = \omega (\text{AIRH2O}, T = T_{AR,2}, R = RH_2, P = P_{atm})$$

Balance de energia de TE-01

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_{8,AE} \cdot (h_{AE,e} - h_{AE,s})}{h_{AR,2} - h_{AR,1} - (\omega_2 - \omega_1) \cdot h_{AE,s}}$$

$$\dot{V}_{AIR} = \dot{m}_a \cdot v_{TE}$$

$$\dot{m}_{FAE} = \dot{m}_a \cdot (\omega_2 - \omega_1)$$

$$\dot{E}_{TE} = \dot{m}_a \cdot Cp_{Aire} \cdot (T_{AR,2} - T_{BH})$$

$$\dot{V}_{AIR} \cdot \frac{3600}{1} = \dot{V}_{AIR,hora}$$

$$\rho_{AP} = \rho (\text{water}, T = T_{BH,prom}, P = P_{atm})$$

$$\dot{m}_{AF,RAE} = \frac{\dot{m}_{FAE}}{\rho_{AE}} \cdot \frac{3600}{1} \cdot \frac{24}{1} \cdot \frac{30}{1}$$

$$\dot{m}_{AP} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_{AE}} \cdot \frac{3600}{1} \cdot \frac{24}{1} + \dot{m}_{AF,RAE}$$

$$\text{Potencia}_{\text{ventilador}} = 5.5 \text{ [kW]}$$

$$\text{HP}_{\text{ventiladores}} = \text{Potencia}_{\text{ventilador}} \cdot \text{Conver}_{1\text{hp,W}}$$

$$\text{Número}_{\text{ventiladores}} = 2.0 \times 10^{-11} \cdot \dot{V}_{\text{AIR,hora}}^2 + 0.00003 \cdot \dot{V}_{\text{AIR,hora}} + 0.1228$$

$$\dot{W}_{\text{TE}} = \text{Potencia}_{\text{ventilador}} \cdot \text{Número}_{\text{ventiladores}}$$

BOMBA POZO-EVAPORADOR

Datos y descripción de AG,pozo

$$P_{\text{sistema,pozo}} = 10000 \text{ [kPa]}$$

$$x_{\text{pozo}} = 0$$

$$P_{\text{S,BPE}} = P(\text{water}, T = T_{1,\text{AG}}, X = x_{\text{pozo}})$$

$$P_{\text{D,BPE}} = P_{\text{max}}$$

$$\text{Altura}_{1,\text{PE}} = 500 \text{ m}$$

$$\text{Altura}_{2,\text{BPE}} = 2 \text{ m}$$

$$\text{Eta}_{\text{BPE}} = 0.85$$

$$\mu_{\text{AG}} = \text{Visc}(\text{water}, T = T_{1,\text{AG}}, P = P_{\text{S,BPE}} + 0.1)$$

$$\phi_{\text{Tubería,succión}} = 12 \text{ [in]} \quad \phi_{\text{T}} = \phi_{\text{Tubería,succión}} \cdot 0.0254$$

$$\text{Tramo}_{\text{B,E}} = 18 \text{ m}$$

Calculos de bomba

$$\dot{Q}_{\text{BPE}} = \dot{m}_{\text{pczo}} \cdot \text{Conv}_{1\text{kg,s}}$$

$$V_{\text{media,BPE}} = \frac{\dot{Q}_{\text{BPE}}}{S_{\text{BPE}}} \text{ Velocidad promedio del fluido en tubería}$$

$$N_{\text{Re,BPE}} = \frac{V_{\text{media,BPE}} \cdot \rho_{\text{AG,T5}} \cdot \phi_{\text{T}}}{\mu_{\text{AG}}}$$

$$E_{\text{D,AComercial,PE}} = 0.00015$$

$$E_{\text{D,ARemachado,PE}} = 0.01$$

$$K_{\text{BPE}} = 0.27 \cdot E_{\text{D,ARemachado,PE}} + \frac{5.74}{N_{\text{Re,BPE}}^{0.9}}$$

$$f_{\text{BPE}} = \frac{0.25}{\log^2(K_{\text{BPE}})} \text{ Factor de fricción}$$

$$g_c = 9.81 \text{ [kg-m/kg.f-s]}$$

$$H_{\text{FS}} = \frac{f_{\text{BPE}} \cdot \text{Tramo}_{\text{B,E}} \cdot V_{\text{media,BPE}}^2}{2 \cdot \phi_{\text{T}} \cdot g_c} \text{ Perdidas por fricción}$$

$$W_{\text{F,BPE}} = \text{Altura}_{1,\text{PE}} + \text{Altura}_{2,\text{BPE}} + H_{\text{FS}}$$

$$S_{\text{BPE}} = \frac{\pi \cdot \phi_{\text{T}}^2}{4}$$

$$\text{Potencia}_{\text{req,BPE}} = W_{\text{F,BPE}} \cdot V_{\text{media,BPE}} \cdot S_{\text{BPE}} \cdot \rho_{\text{AG,T5}}$$

$$Pot_{BPE} = Potencia_{req,BPE} \cdot \frac{1}{Conver_{1hp,kgfms}} \cdot Conver_{1hp,W}$$

$$\dot{W}_{BPE} = \frac{Pot_{BPE}}{\eta_{BPE}}$$

$$v_{esp,BPE} = v(\text{water}, T = T_{1,AG}, P = P_{S,BPE} + 0.01)$$

$$P_{2,BPE} = P_{S,BPE} - \frac{-Altura_{1,PE}}{v_{esp,BPE}} - \frac{V_{media,BPE}^2}{2 \cdot gc \cdot v_{esp,BPE}}$$

$$P_{3,BPE} = P_{D,BPE} - \frac{-Altura_{2,BPE}}{v_{esp,BPE}} - \frac{V_{media,BPE}^2}{2 \cdot gc \cdot v_{esp,BPE}}$$

$$P_{2,BPE} \cdot v_{esp,BPE} + Altura_{1,PE} + \frac{V_{media,BPE}^2}{2 \cdot gc} = P_{3,BPE} \cdot v_{esp,BPE} + Altura_{2,BPE} + \frac{V_{media,BPE}^2}{2 \cdot gc} + H_{FS} + W_{f,prim}$$

$$Pot_{BPE,2} = W_{f,prim} \cdot \frac{1}{Conver_{1hp,kgfms}} \cdot Conver_{1hp,W}$$

$$\dot{W}_{BPE,2} = \frac{Pot_{BPE,2}}{\eta_{BPE}}$$

COMPRA TE-CONDENSADOR

Datos de agua de enfriamiento y TE

$$P_{S,BAT} = 101.32 \text{ [kPa]}$$

$$P_{D,BAT} = P_{min}$$

$$Altura_{1,BAT}=2_m$$

$$Altura_{2,BAT}=5_m$$

$$Tramo_{B,TC}=6_m$$

$$\eta_{BAT}=0.85$$

$$\rho_{AE} = \rho(\text{water}, T = T_{7,AE}, P = P_{S,BAT})$$

$$\phi_{Tuberia,succion,BAT} = 3 \text{ [in]} \quad \phi_{T,BAT} = \phi_{Tuberia,succion,BAT} \cdot 0.0254$$

$$\mu_{AE} = \text{Visc}(\text{water}, T = T_{7,AE}, P = P_{S,BAT} + 0.1)$$

Calculos bomba

$$\dot{Q}_{EAT} = \dot{m}_{7,AE} \cdot Conv_{1kg,s}$$

$$V_{media,BAT} = \frac{\dot{Q}_{EAT}}{S_{BAT}} \text{ Velocidad promedio del fluido en tuberia}$$

$$N_{Re,BAT} = \frac{V_{media,BAT} \cdot \rho_{AE} \cdot \phi_{T,BAT}}{\mu_{AE}}$$

$$E_{D,AComercial,TC} = 0.0006$$

$$E_{D,ARemachado,TC} = 0.013$$

$$K_{BAT} = 0.27 \cdot E_{D,ARemachado,TC} + \frac{5.74}{N_{Re,BAT}^{0.9}}$$

$$F_{BAT} = \frac{0.25}{\log^2(K_{BAT})} \text{ Factor de fricción}$$

ANEXO B. DETERMINACIÓN DE ESTADOS TERMODINÁMICOS Y BALANCES DE ENERGÍA DEL ORCR.

Estado 1:

$$\left. \begin{array}{l} s_{1i} = s_{12} = 1.306 \frac{kJ}{kg K} \\ P_1 = 1390 \text{ kPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_{1i} = 295.3 \frac{kJ}{kg} \\ T_{1i} = 343.6 \text{ K} \end{array}$$

Se obtiene el trabajo ideal que requiere la bomba, por medio del balance de energía:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{BAORC_{2i}} &= \dot{m}_{1R245fa} * (h_{1i} - h_{12}) \\ \dot{W}_{BAORC_i} &= 42.84 \frac{kg}{s} * \left(295.3 \frac{kJ}{kg} - 294.6 \frac{kJ}{kg} \right) \\ \dot{W}_{BAORC_{2i}} &= 27.71 \frac{kJ}{s} \end{aligned}$$

Considerando que la eficiencia mecánica de la bomba de 85%:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{BAORC_2} &= \frac{27.71 \frac{kJ}{s}}{0.85} \\ \dot{W}_{BAORC_2} &= 32.59 \text{ kW} \end{aligned}$$

Se obtiene la entalpía real en la corriente 1, con el balance de energía:

$$\begin{aligned} \left(\dot{m}_{12R245fa} * h_{12} \right) + \dot{W}_{BAORC_2} &= \dot{m}_{1R245fa} * h_1 \\ \left(42.84 \frac{kg}{s} * 294.6 \frac{kJ}{kg} \right) + 32.59 \frac{kJ}{s} &= 42.84 \frac{kg}{s} * h_1 \\ h_1 &= 295.4 \frac{kJ}{kg} \end{aligned}$$

Teniendo así en el estado 1 que corresponde a la salida de la bomba y entrada al generador de vapor:

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = 295.4 \frac{kJ}{kg} \\ P_1 = 1390 \text{ kPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_1 = 1.308 \frac{kJ}{kg K} \\ T_1 = 343.2 \text{ K} \end{array}$$

Estado 2:

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = 1390 \text{ kPa} \\ T_2 = 378 \text{ K} > T_{\text{saturación}@P_2} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_2 = 1.795 \frac{kJ}{kg K} \\ h_2 = 477.5 \frac{kJ}{kg} \end{array}$$

Del balance de energía del generador y con la misma energía cedida del fluido geotérmico al generador de vapor que el ORC Base, se obtiene el flujo másico del ciclo.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{GV} &= \dot{m}_{2R245fa} * (h_2 - h_1) \\ 7,800 \frac{kJ}{s} &= \dot{m}_{2R245fa} * \left(477.5 \frac{kJ}{kg} - 295.4 \frac{kJ}{kg} \right) \\ \dot{m}_{2R245fa} &= 42.84 \frac{kg}{s} \end{aligned}$$

Estado 3:

$$\left. \begin{array}{l} s_2 = s_{3i} = 1.795 \frac{kJ}{kg K} \\ P_3 = 202 \text{ kPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_{3i} = 441.8 \frac{kJ}{kg} \\ \dot{W}_{TV2i} = \dot{m}_{3R245fa} * (h_2 - h_{3i}) \end{array}$$

$$\dot{W}_{TV2i} = 33.03 \frac{kg}{s} * \left(477.5 \frac{kJ}{kg} - 441.8 \frac{kJ}{kg} \right) = 1,178 \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{W}_{TV2i} = 1,178 \text{ kW}$$

Considerando la eficiencia de la turbina en 90%, se sustituye:

$$\eta_{TV} = \frac{\dot{W}_{TV2}}{\dot{W}_{TV2i}}$$

$$\dot{W}_{TV2} = \eta_{TV} * \dot{W}_{TV2i} = 0.90 * 1,178 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{TV2} = 1,060 \text{ kW}$$

Del balance de energía resulta la entalpía real de la corriente 3:

$$\dot{m}_{3R245fa} * h_2 = \dot{m}_{3R245fa} * h_3 + \dot{W}_{TV2}$$

$$33.03 \frac{kg}{s} * 477.5 \frac{kJ}{kg} = 33.03 \frac{kg}{s} * h_3 + 1,060 \frac{kJ}{s}$$

$$h_3 = 445.4 \frac{kJ}{kg}$$

Teniendo así en la corriente 3:

$$\left. \begin{array}{l} h_3 = 445.4 \frac{kJ}{kg} \\ P_3 = 202 \text{ kPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_3 = 1.806 \frac{kJ}{kg K} \\ T_3 = 323.4 K \end{array} \quad x_3 = 1$$

Estado 4:

$$\left. \begin{array}{l} x_4 = 0 \\ P_4 = 202 \text{ kPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_4 = 1.152 \frac{kJ}{kg K} \\ h_4 = 244.1 \frac{kJ}{kg} \end{array} \quad T_4 = 306.9 K$$

Del balance de energía del condensador:

$$\dot{E}_{Condensador} = \dot{m}_{4R245fa} * (h_3 - h_4)$$

$$\dot{E}_{Condensador} = 33.03 \frac{kg}{s} * \left(445.4 \frac{kJ}{kg} - 244.1 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$\dot{E}_{Condensador} = 5,127 \frac{kJ}{s}$$

Estado 10:

$$\left. \begin{array}{l} s_{10i} = s_2 = 1.795 \frac{kJ}{kg K} \\ P_4 = 610 \text{ kPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} x_{10} = 1 \\ h_{10i} = 462.5 \frac{kJ}{kg} \end{array} \quad T_{10i} = 349.8 K$$

$$\dot{W}_{TV1i} = \dot{m}_{10R245fa} * (h_2 - h_{10i})$$

$$\dot{W}_{TV1i} = 9.803 \frac{kg}{s} * \left(477.5 \frac{kJ}{kg} - 462.5 \frac{kJ}{kg} \right) = 146.5 \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{W}_{TV1i} = 146.5 kW$$

Considerando las mismas ecuaciones que en la corriente 3, la potencia eléctrica que genera es de:

$$\dot{W}_{TV1} = 136.2 kW$$

Y la entalpía real de la corriente 10:

$$h_{10} = 463.6 \frac{kJ}{kg}$$

Teniendo así en la corriente 10:

$$\left. \begin{array}{l} h_{10} = 463.6 \frac{kJ}{kg} \\ P_3 = 610 kPa \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_{10} = 1.798 \frac{kJ}{kg K} \\ T_{10} = 350.7 K \end{array} \quad x_{10} = 1$$

Estado 11:

$$\left. \begin{array}{l} s_{11i} = s_4 = 1.152 \frac{kJ}{kg K} \\ P_{11} = 610 kPa \end{array} \right\} \begin{array}{l} x_{11} = 0 \\ h_{11i} = 244.4 \frac{kJ}{kg} \end{array}$$

Del balance de energía de la bomba, resulta la potencia ideal requerida:

$$\dot{W}_{BAORC_{1i}} = \dot{m}_{11R245fa} * (h_{11i} - h_4)$$

$$\dot{W}_{BAORC_{1i}} = 33.03 \frac{kg}{s} * \left(244.4 \frac{kJ}{kg} - 244.1 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$\dot{W}_{BAORC_{1i}} = 10.25 \frac{kJ}{s}$$

Considerando la eficiencia mecánica de 85%

$$\dot{W}_{BAORC_1} = \frac{10.25 \frac{kJ}{s}}{0.85}$$

$$\dot{W}_{BAORC_1} = 12.06 \text{ kW}$$

Se obtiene la entalpia real en la corriente 11.

$$\begin{aligned} (\dot{m}_{4_{R245fa}} * h_4) + \dot{W}_{BAORC_1} &= \dot{m}_{11_{R245fa}} * h_{11} \\ \left(33.03 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 244.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 12.06 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} &= 33.03 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * h_{11} \end{aligned}$$

$$h_{11} = 244.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\left. \begin{array}{l} h_{11} = 244.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ P_{11} = 610 \text{ kPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_{11} = 1.153 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \\ T_{11} = 306.9 \text{ K} \end{array}$$

Estado 12:

$$\left. \begin{array}{l} x_{12} = 0 \\ P_{12} = 610 \text{ kPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_{12} = 1.306 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \\ T_{12} = 343.2 \text{ K} \end{array} \quad h_{12} = 294.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Del balance de masa y energía de la corriente 12, donde:

$$\dot{m}_{12_{R245fa}} = \dot{m}_{10_{R245fa}} + \dot{m}_{11_{R245fa}}$$

$$\dot{m}_{12_{R245fa}} = (\dot{m}_{12_{R245fa}} - \dot{m}_{11_{R245fa}}) + \dot{m}_{11_{R245fa}}$$

$$\dot{m}_{12_{R245fa}} * h_{12} = (\dot{m}_{12_{R245fa}} - \dot{m}_{11_{R245fa}}) * h_{10} + \dot{m}_{11_{R245fa}} * h_{11}$$

$$42.84 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 294.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \left(42.84 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - \dot{m}_{11_{R245fa}} \right) * 463.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left(\dot{m}_{11_{R245fa}} * 244.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

Siendo así el flujo masico de la corriente 11 y 10:

$$\dot{m}_{11_{R245fa}} = 33.03 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{10_{R245fa}} = \dot{m}_{12_{R245fa}} - \dot{m}_{11_{R245fa}}$$

$$\dot{m}_{10R245fa} = 42.84 \frac{kg}{s} - 33.03 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{10R245fa} = 9.803 \frac{kg}{s}$$

La fracción de vapor que sale de la corriente 10 es:

$$y_{10} = \frac{\dot{m}_{10R245fa}}{\dot{m}_{12R245fa}}$$

$$y_{10} = 0.2288$$

Consumo energético de los servicios auxiliares

Torre de enfriamiento (TE-01)

Los datos de entrada del aire en la torre es igual que los datos del ORC base, pero debido al cambio que hay en el condensador, los datos de salida del aire y temperaturas cambia. Teniendo en las corrientes 7 y 8:

$$\left. \begin{array}{l} T_7 = 303.2 \text{ K} \\ P_{succión} = 101.325 \text{ kPa} \end{array} \right\} h_7 = 125.8 \frac{kJ}{kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} T_8 = 312 \text{ K} \\ P_{descarga} = 204 \text{ kPa} \end{array} \right\} h_8 = 163 \frac{kJ}{kg}$$

Con un flujo masico de agua de enfriamiento de:

$$\dot{m}_{AE} = 137.9 \frac{kg}{s}$$

Finalizando un consumo energético del ventilador de la torre de enfriamiento:

$$\dot{W}_{TE} = 31.33 \text{ kW}$$

Bomba de TE-01 a CO-01 (BAT-01)

Teniendo las mismas consideraciones al ser una bomba centrífuga con eficiencia mecánica del 85%:

$$\dot{W}_{BAT} = 1.351 \text{ kW}$$

Tabla 1A. Balance de materia y energía del ORC Base

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fluido geotérmico [kg/s]					50	50					
R245fa [kg/s]	33.74	33.74	33.74	33.74							
Agua [kg/s]							227.2	227.2		1.032	
Aire [kg/s]									87.04		
T [°C]	33.74	104.9	50.22	33.74	110	70	29	36.11	25	25	32.11
P [kPa]	1,390	1,390	202	202	1,390	1,390	204	204	101.3	101.3	101.3
Calidad	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
h [kJ/kg]	245.6	477.5	445.5	244.5			121.6	151.4	75.99		159.3
\dot{E} [kJ/s]		7,800		6,762			8,667				642
\dot{W} [kW]	35.69		1,058		82.06		2.91				55.03

Elaboración propia

Tabla 2A. Balance de materia y energía del ORC Regenerativo

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fluido geotérmico [kg/s]					50	50								
R245fa [kg/s]	42.84	42.84	33.09	33.09						9.54	33.09	42.84		
Agua [kg/s]							138.2	138.2					0.84	
Aire [kg/s]									52.47					
T [°C]	70.02	104.9	50.45	34.02	110	70	30	38.89	25	77.56	34.02	70.02	25	33.89
P [kPa]	1,390	1,390	202	202	1,390	1,390	202	202	101.3	610	610	610	101.3	101.3
Calidad	0	1	1	0	0	0	0	0		1	0	0	0	
h [kJ/kg]	295.4	477.5	445.5	244.5			125.8	163	75.99	463.6	244.9	294.6		176.2
\dot{E} [kJ/s]		7,800		5,139		8,667								483.8
\dot{W} [kW]	32.59		1,192		82.06		1.112				12.03			31.41

Elaboración propia

ANEXO C. INDICADORES ECONOMICOS.

VAN			
	ORCR simple	ORCR estimulación	ORCR estacionario
Pesimista	-\$87,058,863.19	-\$114,922,420.06	-\$88,251,579.23
Promedio	-\$86,045,071.50	-\$113,525,204.13	-\$88,251,579.23
Optimista	-\$83,182,929.96	-\$112,044,370.73	-\$88,251,579.23

TIR			
	ORCR simple	ORCR estimulación	ORCR estacionario
Pesimista	-5.51%	-5.22%	-3.70%
Promedio	-4.07%	-4.14%	-3.70%
Optimista	-2.56%	-3.21%	-3.70%

ROI			
	ORCR simple	ORCR estimulación	ORCR estacionario
Pesimista	14.04	18.24	11.69
Promedio	12.99	17.32	11.69
Optimista	12.55	16.49	11.69