



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Desarrollo de ingeniería básica,
de detalle y análisis tecno-
económico de una planta de ciclo
binario de 100 kW de capacidad
operada con geotermia**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero mecánico

P R E S E N T A

Verónica Linares Tapia

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Rodrigo Alarcón Flores



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos.

Agradezco infinitamente al Instituto de Ingeniería de la UNAM y en especial a Grupo IIDEA (Instituto de Ingeniería Desalación y Energías Alternas) por permitirme colaborar con ustedes para la elaboración de esta tesis tan especial para mí que me enorgullece tanto. Espero que siempre sigan con la mentalidad de mejorar y con esa ambición de compartir su gran amor por la geotermia y sus usos directos que tanto los caracteriza.

Agradezco a mis compañeros y a los amigos que hice ahí por hacer de esto algo mejor y por todo lo compartido.

Agradezco de igual manera a CeMIE-Geo por brindar el apoyo para la realización del proyecto 207032 Conacyt/Sener.

A mi tutor, Rodrigo Alarcón, por el conocimiento que compartió conmigo en la elaboración de esta tesis.

A Héctor Aviña por tener la confianza en mí y permitirme colaborar con Grupo IIDEA.

Dedicatoria.

Esta tesis es primordialmente para mis papás, René y Gloria, que siempre han apoyado mis decisiones tanto personales como académicas y ahora laborales, y quienes son las personas en las que más confiaré siempre y con las que sé que contaré toda mi vida, los amo mucho. Gracias por siempre exigirme más, por su amor, admiración y apoyo incondicional.

A mis hermanas, Angie y Paola, quienes fueron mis primeras amigas en la vida. Gracias por preocuparse siempre por mí, por quererme, por las risas, por el apoyo y por acompañarme en esta vida. No sería la misma sin ustedes, las amo.

A Lucky, mi perrito, por siempre estar a mi lado y por ser mi compañero de desvelos desde la secundaria y hasta la culminación de esta tesis.

A mis abuelas, Goyita y Rebeca, por su ternura, su cariño, sus consejos y por admirarme y motivarme a seguir siempre adelante.

A Roberto, por darme el coraje de lanzarme a hacer una tesis, de la cual he aprendido mucho y me ha regalado un año lleno de experiencias que nunca olvidaré. Gracias por apoyarme en todo momento, gracias por tu amor, tu admiración, tu respeto, tu motivación y tu compañía.

A mis amigos, que siempre han confiado en mí y que me han hecho la vida académica mucho más divertida. Gracias por la motivación, por entenderme y quererme. Sin ustedes no sería todo esto tan memorable. Quiero vernos a todos cumplir nuestras metas y objetivos.

TABLA DE CONTENIDO

Siglas y acrónimos.....	6
Introducción.....	8
Hipótesis.....	8
Objetivo.....	8
Objetivos específicos.....	9

Capítulo 1. Antecedentes.

1.1 Matriz energética nacional	10
1.2 La geotermia a nivel mundial	12
1.3 La geotermia en México.....	14
1.4 Plantas geotermoeléctricas	16
1.4.1 Clasificación de las plantas geotermoeléctricas	17
1.4.2 Condiciones de operación en los sistemas geotérmicos.	20
1.4.3 Potencias o capacidad	21
1.4.4 Tipos de yacimientos geotérmicos	21
1.5 Energía geotérmica para carga base	23
1.6 Energía geotérmica para carga en punta.....	26
1.7 Generación Distribuida en México	26
1.7.1 ORC para generación distribuida operados con geotermia	28
1.8 Fuentes consultadas	29

Capítulo 2. Sistemas ORC (*Organic Rankine Cycle*)

2.1 Plantas de generación de media y baja entalpía.....	32
2.1.2 Configuraciones de las plantas ORC.	33
2.2 Estado del arte de las plantas ORC.....	40
2.2.1 Ciclos supercríticos	40
2.2.2 Tecnologías de expansión.....	41
2.3 Fluidos de trabajo.....	46
2.3.1 Características.....	47
2.3.2 Selección del fluido de trabajo.....	48
2.4 Introducción a la selección de tuberías, bridas y válvulas.	54
2.4.1 Metodología de selección de tuberías.....	54

2.4.2 Metodología de selección de bridas	56
2.4.3 Metodología de selección de válvulas	56
2.5 Fuentes consultadas	58

Capítulo 3. Ingeniería básica y de detalle de un ciclo ORC con capacidad energética de 100 [kW]

3.1 Análisis de la fuente energética.	60
3.2 Balance de masa y energía.....	62
3.2.1 Cálculo de cargas térmicas	65
3.2.2 Estados termodinámicos del Ciclo Binario simple.....	66
3.2.2 Eficiencia de primera ley	71
3.2.3 Identificación de irreversibilidades.....	72
3.3 Diseño de placa orificio para medición del caudal.....	74
3.3.1 Consideraciones para el diseño	76
3.3.2 Cálculo de la placa y resultados.....	77
3.3.3 Instalación de la placa orificio.....	78
3.4 Selección de equipo.....	80
3.4.1 Selección de expansor	81
3.4.2 Selección de intercambiadores de calor.....	82
3.4.3 Selección de bombas	84
3.4.4 Selección de torre de enfriamiento.....	86
3.5 Selección de tuberías, válvulas y bridas	88
3.5.1 Memoria de cálculo para la selección de tuberías	88
3.5.2 Memoria de cálculo para la selección de bridas.....	91
3.5.3 Memoria de cálculo para la selección de válvulas	92
3.6 Instrumentación y Control	93
3.6.1 Diagramas de flujo de proceso.....	94
3.6.2 Diagramas de instrumentación y control	95
3.7 Lista de componentes y especificaciones técnicas.....	96
3.8 Precomisionamiento y comisionamiento para la puesta en marcha de una planta ORC. 98	
3.8.1 Requerimientos de instalación (permisos).	99
3.8.2 Normas de seguridad	100
3.9 Fuentes Consultadas.....	103

Capítulo 4. Análisis Económico y de mercado de una planta ORC.

4.1	Desglose de gastos.....	104
4.1.1	Capital total invertido	105
4.1.2	Costos de mantenimiento y operación O&M	108
4.2	Ingeniería económica de una planta ORC	108
4.2.1	El valor del dinero en el tiempo	108
4.2.2	Costo Unitario de Generación	109
4.2.3	Rentabilidad Financiera.....	110
4.2.4	Resultados del análisis y discusión	111
4.3	Análisis de la viabilidad económica de sistemas ORC	113
4.3.1	Mercado internacional de los ORC.....	113
4.3.2	Mercado nacional de los ORC.....	115
4.3.3	Costos de los ORC.....	115
4.3.4	Áreas de oportunidad. Empresas con remanentes energéticos en el país.	117
4.4	Módulos de ORC instalados actualmente en el mundo.	124
4.5	Comparación con otras tecnologías.....	125
4.5.1	Energía Solar.....	125
4.5.2	Energía Eólica.	129
4.6	Fuentes Consultadas.....	132

Capítulo 5. Conclusiones.

5.1	Propuestas de mejora	134
5.2	Conclusiones.....	137
2	ANEXOS.....	140
2.1	Dimensiones y pesos de tuberías de acero con o sin costura ASME B36.10 M	140
2.2	Máximo esfuerzo permisible SE para acero SA-106-B	143
2.3	Valores de coeficiente Y en ecuación de espesor de tubería	143
2.4	Tablas de esfuerzo de cedencia para aceros ASTM A 105 y A216-WCB con respecto a la temperatura de diseño.....	144
2.5	Tablas de resistencia a la tracción para aceros ASTM A105 y A216-WCB.....	146
2.6	Tabla de tope de presión p_c por clase de brida con respecto a la presión para materiales SA-105, tomado de ASME B16.5.	148

2.7 Tabla de tope de presión <i>pca</i> por clase de válvula con respecto a la presión para materiales SA-105, tomada de ASME B16.34	149
3.1 Tabla para determinar el Coeficiente de descarga de acuerdo con D, Re y β . Extraído de ISO 5167-2.	150
3.2 Tabla para las distancias requeridas para la instalación de la placa orificio. Extraído de ISO 5167-2.....	151
4.1 Análisis económico en Excel.....	152

Siglas y acrónimos

AE	Agua de enfriamiento
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i> , por sus siglas en inglés.
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> , por sus siglas inglés.
CAD	<i>Computer Aided-Design</i> o Diseño Asistido por Computadora
CCC	Centrales de Ciclo Combinado
CCM	Costo de Compra de Maquinaria
CeMIE-GEo	Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica
CFC	Compuestos Clorofluorocarbonados
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CIATEQ	Centro de Tecnología Avanzado
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
CRE	Comisión Reguladora de Energía
CTI	Costo Total de la Inversión
DENUE	Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas
DFP	Diagrama de Flujo del Proceso
D.N.	Diámetro Nominal
DTI	Diagrama de Tuberías e Instrumentación
EGS	<i>Enhanced Geothermal System</i> , por sus siglas en inglés.
EO	Energía Eólica
E.U.A.	Estados Unidos de América
FED	Fuente de Energía Distribuida
FT	Fluido de Trabajo
FV	Fotovoltaico
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GD	Generación Distribuida
GPM	Galones por minuto
GWh/a	Gigawatt Hora por Año
GWP	<i>Global Warming Potential</i> , por sus siglas en inglés
HC	Compuestos Hidrocarbonados
HCFC	Compuesto Hidroclorofluorocarbonados
HFC	Compuestos Hidrofluorocarbonados
HFO	Ácido Hipofluoroso
HP	<i>Horse Power</i> o Caballos de fuerza
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i> o Motor de Combustión Interna
I&C	Instrumentación y Control
IIDEA	Instituto de Ingeniería Desalación y Energías Alternas
IGA	<i>International Geothermal Association</i> , por sus siglas en inglés.

ISO	<i>International Organization for Standardization</i> , por sus siglas en inglés.
kg	Kilogramo
kWe	Kilowatt
LS	Líquido saturado
LSE	Líquido subenfriado
MW	Mega Watt
mxn	Peso mexicano
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
NPS	Normal Pipe Size
ODP	<i>Ozone Depletion Potential</i> , por sus siglas en inglés.
ORC	<i>Organic Rankine Cycle</i> , por sus siglas en inglés.
O&M	Operación y Mantenimiento
PAMRT	Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión
PIB	Producto Interno Bruto
PIE	Productores Independientes de Energía
RE	Recurso Energético
SC	Sistema de Condensación
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SENER	Secretaría de Energía
SG	Sistema Geotérmico
SRO	Sistema Rankine Orgánico
TIR	Tasa Interna de Retorno
TLC	Ciclo Trilateral
USD	Dólares Americanos
VAN	Valor Actual Neto
VS	Vapor Saturado
VSC	Vapor sobrecalentado
WRI	<i>World Resources Institute</i>
XS	<i>Extra Strong</i>

Introducción

El proyecto IIDEA 100 es una propuesta que se está realizando en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, con ayuda del CeMIE-Geo (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica). El objetivo es diseñar un ciclo binario modular con una capacidad energética de 100kW. Anteriormente, se había realizado un proyecto similar, con la diferencia de que la capacidad era de 10 kW, por lo tanto, este proyecto representa un escalamiento del proyecto anterior. Para más información, consultar la tesis **“Diseño básico y de detalle de un ciclo binario de evaporación instantánea de 10kWe netos para el aprovechamiento de remanentes energéticos”**¹ donde se hace referencia a la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo de la ingeniería básica para el proyecto con capacidad de 10 kW descrito anteriormente.

El proyecto nace de la inminente necesidad de mitigar el impacto ambiental generado por los diferentes procesos que para su funcionamiento consumen algún tipo de energía, disminuyendo los gases nocivos que salen a la atmósfera e identificando las oportunidades para aprovechar desperdicios energéticos que puedan ser utilizados para generar más potencia. El IIDEA 100 está diseñado principalmente para funcionar con recursos térmicos de baja y mediana entalpía mediante el uso de la geotermia, sin embargo, permite de igual manera la generación eléctrica empleando fuentes energéticas de calor residual, convirtiéndolo en un proyecto versátil de generación eléctrica limpia. El lugar de instalación del ciclo binario será el Domo de San Pedro en el estado de Nayarit en México, donde se llevarán a cabo las pruebas pertinentes una vez se encuentre terminado.

Uno de los objetivos más característicos del IDEA 100 es que el Ciclo Binario presentado sea capaz de ser transportado e instalado como pequeños módulos en zonas geográficas donde el acceso a la red eléctrica no es una opción viable, para de esta manera contribuir en el desarrollo energético del país; así como en empresas que cuenten con remanentes energéticos que pudieran ser utilizados como fuentes de calor para los ORC. Actualmente en México no se encuentra una oferta tecnológica para el aprovechamiento de recursos geotérmicos de baja y media entalpía, lo que brinda un área de oportunidad para la mitigación de problemas ambientales mediante su uso, así como para su introducción en el mercado mexicano, presentándolo a clientes potenciales que pudieran implementar y aprovechar esta tecnología en nuestro país.

Hipótesis

- El mejor método de expansión para el ORC será la turbina, esto debido a que son máquinas que entregan grandes potencias y que se pueden diseñar compactamente, así como por su alto grado de eficiencia.
- El mejor fluido de trabajo para el ORC será el que tenga el rango de temperaturas más alto, esto debido a que podrá generar potencia a las mismas condiciones de operación, lo que reduciría también costos de operación debido a que necesitaría

¹ Encarnación, J., *Diseño básico y de detalle de un ciclo binario de evaporación instantánea de 10 kWe netos para el aprovechamiento de remanentes energéticos*, Ciudad de México, 2018

menos cantidad de refrigerante para otorgar la misma potencia de 100 kW que se está buscando.

- Los ORC representan una alternativa tecnológica renovable económicamente mejor que la energía solar y la eólica gracias a su alto factor de planta.

Objetivo

Plantear el diseño de la ingeniería básica y de detalle para un ciclo binario modular que entregue 100 kW de potencia, con la particularidad de que pueda ser operado con geotermia, así como plantear la posibilidad de utilizarlo para cogeneración con el aprovechamiento de remanentes térmicos. Posteriormente hacer un análisis económico para obtener un costo unitario de generación, junto con su costo de fabricación, y de esta manera generar un estudio de mercado de los ciclos binarios en un panorama mundial y nacional; para así proponer su implementación y comercialización en México.

Objetivos específicos

1. Dar un panorama general de la geotermia a nivel mundial y nacional, así como la clasificación de las distintas plantas geotermoeléctricas.
2. Explicar las diferentes configuraciones de plantas de ciclo binario existentes y presentar una propuesta de diseño para la planta de ciclo binario de 100 kW de potencia que se está desarrollando en grupo IIDEA. Determinar los criterios de selección para el fluido de trabajo y su desempeño en el ciclo.
3. Trabajar la ingeniería básica y de detalle del ciclo binario de 100 kW. Hacer el balance de masa y energía, selección de equipos, selección de clases de tuberías, válvulas y bridas, generación de planos de construcción y diagramas, así como especificaciones del área mecánica, civil, eléctrica y de I&C.
4. Realizar un análisis tecnoeconómico del ciclo binario, considerando costos de inversión y tiempo de recuperación. Generar un estudio de mercado de los ORC alrededor del mundo y las áreas de oportunidad para su implementación en México.

Capítulo 1.

Antecedentes

En este capítulo se estudiará la situación actual de México respecto a la generación eléctrica y algunos de los planes energéticos que se contemplan para el futuro. Se hablará de la geotermia a nivel mundial como nacional y se hará énfasis en el gran potencial que alberga este tipo de energía. Se dará una descripción sobre distintas configuraciones de plantas geotermoeléctricas utilizadas en la actualidad, y se introducirá el Ciclo Orgánico Rankine, el cual será fuente de estudio en este proyecto.

De igual manera se contemplará el esquema eléctrico de carga base y carga punta que se relacionan con la demanda energética del país en distintos momentos del día, y la utilización y los beneficios de la geotermia en cada uno de ellos.

Finalmente, se hablará sobre la generación distribuida en México y su posible relación con la geotermia.

1.1 Matriz energética nacional

En la actualidad, el país se encuentra en la imperativa necesidad de mejorar la productividad en el campo energético, restituir las reservas de hidrocarburos y diversificar las fuentes energéticas, con el fin de tener una considerable reducción en los impactos ambientales que ocasiona la generación eléctrica por medio de combustibles fósiles.

Como bien es sabido, la quema de combustibles fósiles es una de las mayores fuentes de GEI (Gases de Efecto Invernadero) en el mundo, esto debido a que liberan grandes cantidades de CO₂ y otros contaminantes que crean un gran impacto en el medio ambiente. De acuerdo con el Centro de soluciones climáticas y energética [1], el 70% de las emisiones de GEI que se producen en el planeta, se deben a los impactos que genera el sector industrial energéticamente en cualquiera de sus tipos (electricidad, calor y transporte).

Por la razón anterior se está buscando darle participación al desarrollo de energías renovables, para que sean parte del balance energético nacional junto con el ahorro de energía y lograr así una mayor eficiencia de su producción y fomentar el uso de las energías renovables para contribuir a la transición energética con enfoques de alta eficiencia y sustentabilidad.

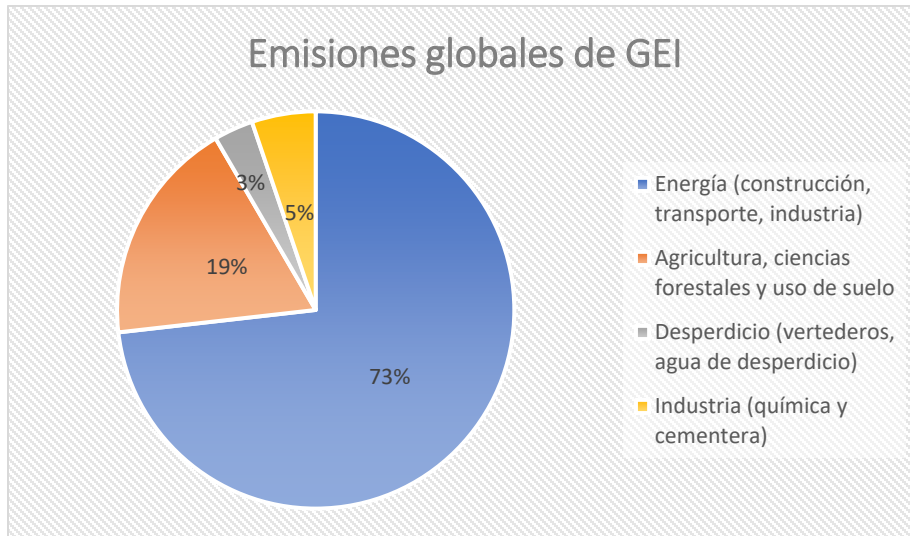


Figura 1.1 Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector. [2]

Al cierre del 2020, la capacidad entregada a la Red Eléctrica de la CFE, de los Generadores, antes definidos como PIE (Productores Independientes de Energía) y del resto de los permisionarios conectados a la Red Eléctrica, alcanzó un valor de 83,121 MW, mientras que al cierre de diciembre de 2021 se incrementó hasta 86,153 MW, lo que refleja un incremento del 3.65% respecto al año anterior. Este incremento se debe principalmente, a adiciones como Centrales de Ciclo Combinado (CCC) (1,693 MW), Energía Eólica (EO) (473 MW), y Centrales Fotovoltaicas (FV) (805 MW) (PAMRNT, 2022, pág. 30)²

En la siguiente figura, se puede observar el porcentaje de capacidad instalada de cada tecnología al 31 de diciembre de 2021.

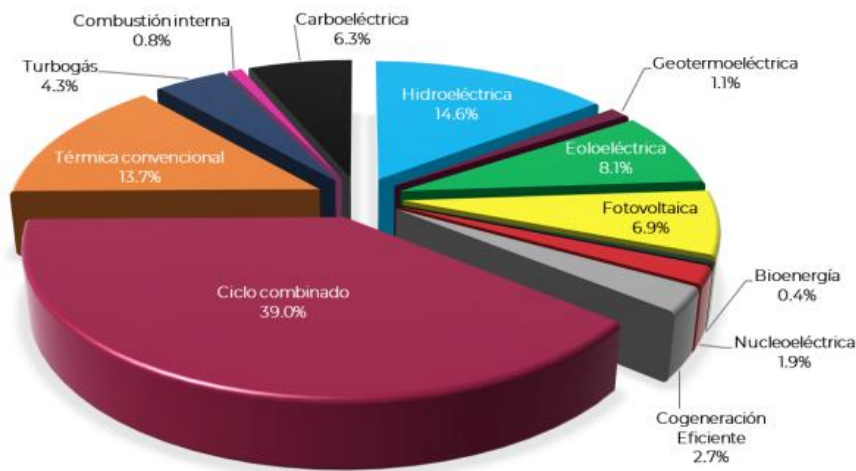


Figura 1.2 Capacidad eléctrica en porcentajes de los distintos tipos de tecnología en México a diciembre de 2021. [3]

² PAMRNT: Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista (PAMRNT 2022-2036)

Como se observa en la figura 1.2, actualmente las Energías Limpias en México ocupan solamente el 35.7% del total de la generación eléctrica, cifra que aún se encuentra baja si, según el objetivo nacional, para el 2030 se planea alcanzar una capacidad de 49% [4], esto con el fin de fortalecer el uso de Energías Limpias y Renovables para la generación eléctrica, y a su vez, ampliar la capacidad eléctrica nacional. Dada esta razón es que se implementa la Ley de Transición Energética, la cual establece que el incremento de las Energías Limpias debe ser gradual, garantizando la confiabilidad de la red eléctrica y cumpliendo con las condiciones de viabilidad económica, para así poder cumplir con las metas en materia de generación de Energía Limpia y la reducción de emisiones al ambiente.

En el año 2020, la capacidad instalada de las Centrales Eléctricas de Energía Limpia tales como, Hidroeléctrica (HI), Geotérmica (GEO), Eólica (EO), Fotovoltaica (FV) y de Bioenergía (BIO), fue de 25,594 MW, y al cierre de diciembre del 2021 se tiene 26,899 MW, lo que representa un incremento del 5.1% respecto a 2020. Actualmente en el país se está apostando mucho por energías renovables tales como la Solar (planta Santiago [5]), la hidroeléctrica (La Yesca), la eólica (La Venta), y la geotermia, la cual tiene un gran potencial de explotación y en la que se ahondará más adelante.

En el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024, se establece que la nueva política energética del Estado mexicano impulsará el desarrollo sostenible mediante la incorporación de poblaciones y comunidades a la producción de energía con fuentes renovables, mismas que serán fundamentales para suministrar de energía a las pequeñas comunidades aisladas que aún carecen de ella y que suman alrededor de dos millones de habitantes (PAMRNT, 2022). Esto debido a que el suministro eléctrico trae consigo beneficios sociales tales como: salud, vivienda y educación, lo que proveería de condiciones que ayudarían a las poblaciones rurales a disminuir la situación de pobreza y aumentar su calidad de vida.

1.2 La geotermia a nivel mundial

La energía geotérmica se define como la energía natural de la Tierra, en forma de calor, que se encuentra atrapada bajo la superficie. Ésta, se encuentra contenida en las rocas y fluidos debajo de la corteza terrestre y puede ser encontrada tan profundo hasta donde se encuentre el magma. Se trata de una energía renovable, prácticamente inagotable, con una madurez tecnológica sólida, limpia, versátil y útil para generar electricidad, además de otras múltiples aplicaciones.

Actualmente la capacidad de generación de energía geotérmica se encuentra en un valor aproximado de 15,400 MW, sin embargo, se espera que, con el desarrollo de técnicas mejoradas de exploración y explotación, la generación termoeléctrica se convierta en una pieza clave dentro del abanico energético mundial, de hecho, se estima que durante los próximos 15-20 años se alcance una capacidad de 28,000 MW [6]. Los mercados clave de crecimiento son Asia, África, Europa y América del Norte.

La energía geotérmica se ha implementado actualmente en más de 20 países, donde sobresalen los siguientes:

País	Capacidad eléctrica en MW
Estados Unidos de América	3,714
Indonesia	2,133
Filipinas	1,918
Turquía	1,688
Nueva Zelanda	1,005
México	963
Italia	944
Kenia	861
Islandia	755
Japón	603

Tabla 1.1 Capacidad eléctrica por medio de la geotermia a nivel mundial. (Obtenido de Think Geoenergy Research 2021)

Es bien sabido que la geotermia ha ido en alza en los últimos años. En el caso específico de Indonesia, el país cuenta con un excelente potencial de explotación geotérmica, ya que hay más de 299 sitios geotérmicos en espera de ser explotados (Jorquera, 2018). La razón del éxito geotérmico en dicho país es que existe sector privado que no duda en invertir en las licencias para la excavación y creación de pozos geotérmicos, pues saben de los altos costos de inversión, pero entienden en mayor medida el beneficio energético que trae consigo la geotermia, específicamente a su gente.

A pesar de que la energía térmica se dispersa a lo largo de la corteza terrestre, existen lugares donde se presentan mayores potenciales energéticos cerca de la superficie, para ser aprovechados y explotados por el hombre. Estas zonas se localizan principalmente donde se observan los mayores gradientes de temperatura, ya sea en límites de placas tectónicas o de volcanes jóvenes. En el mapa siguiente, se puede observar un mapa mundial, donde se analizan posibles regiones geotérmicas.

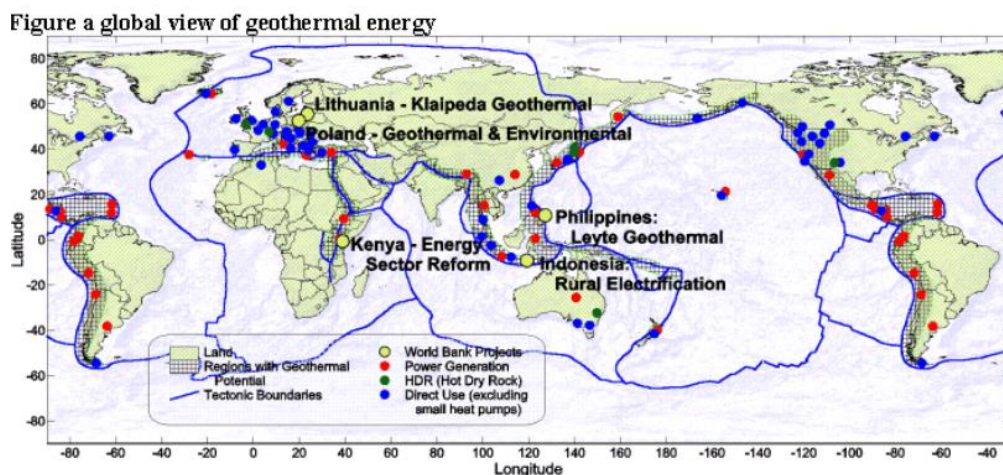


Figura 1.3 Mapa tectónico y su relación con la geotermia. Copiado de [7] el 29/06/2022

1.3 La geotermia en México

En cuanto a México, la historia de la geotermia empieza en 1959 cuando la ahora Comisión Federal de Electricidad comenzó el desarrollo de la instalación de la primera planta geotérmica experimental de 3,000 kW en la zona de Pathe, Hidalgo. A pesar de que esta planta sólo operó 14 años por su baja capacidad, sirvió de motivación para que el gobierno federal continuara con la exploración y desarrollo geotérmico en otras zonas, como la de Cerro Prieto, Baja California e Ixtán de los Hervores en Michoacán.

La ubicación de México en el cinturón volcánico del planeta permite que se tenga la oportunidad de aprovechar este recurso y ampliar la capacidad del país para el suministro de energía a través de fuentes limpias. Se estima que, con las reservas probadas, probables y posibles, el potencial de nuestro país sea de 13.4 GW [8]. Las reservas probadas se refieren a todas aquellas que mediante datos de análisis geológicos y de ingeniería se estima con razonable certidumbre que serán comercialmente recuperables, para este tipo de reserva se estima se cuenta con 286 MW. En cuanto a las reservas probables, son reservas no probadas cuyo análisis geológico y de ingeniería sugiere que son más tendientes a ser comercialmente recuperables que no serlo, para las reservas probables corresponden 5,730 MW. Finalmente, las reservas posibles, son aquellas cuyo análisis de datos geológicos y de ingeniería sugiere que son tendientes a ser menos probables de ser comercialmente recuperables que las reservas probables, es aquí donde existe la mayor cantidad de potencial con 7,422 MW. Estos datos explican un poco el por qué no se decide terminar de invertir en la geotermia, pues existe una gran incertidumbre en que los resultados de un proyecto de exploración sean redituables.

Uno de los más grandes esfuerzos por parte del gobierno, a partir de la Reforma Energética, para fomentar la exploración y el desarrollo geotérmico del país es el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo), el cual busca unificar y desarrollar conocimiento en materia de energía geotérmica, logrando sinergias que permitan orientar las actividades de innovación, investigación y desarrollo tecnológico, así como promover la formación de recursos humanos, con el fin de contribuir a la generación de valor económico y al fortalecimiento de la industria geotérmica del país. Actualmente se encuentra coordinando y financiado diversos proyectos relacionados con el desarrollo de la geotermia y los usos directos relacionados con ella, uno de los cuales es el presentado en esta tesis, el cual se explicará con detalle más adelante.

Otra iniciativa por parte del gobierno mexicano para el crecimiento en cuanto al desarrollo de la energía geotérmica fue el que se llevó a cabo desde el 2020, donde el embajador de Francia Jean-Pierre Asvazardourian y el director de la CFE, Manuel Bartlett, establecieron un acuerdo de cooperación con la Embajada de Francia en México para desarrollar energía geotérmica, que utilizará tecnología de los ciclos binarios, con recursos de los Fondos de estudios y ayuda al Sector Privado (FASEP) del gobierno francés. El estudio se realizó a partir del año 2021, con una duración aproximada de 18 meses, por diversos especialistas franceses en la materia, así como con la participación de personal de la CFE. Los resultados arrojaron que la capacidad de generación podría incrementar en 133 GWh/a adicionales, equivalentes a la demanda eléctrica de 85,000 hogares, mientras que la emisión de dióxido de carbono se reduciría 75 kilotoneladas cada año [9].

Actualmente en el país se tienen instalados y en operación tres campos geotérmicos en el Eje Neovolcánico: la Central Geotermoeléctrica Los Humeros, en el área entre Puebla y Veracruz; Los Azufres en Michoacán, El Domo San Pedro en Nayarit y un campo próximo a desarrollarse cerca de Guadalajara, Cerritos Colorados.

Por su parte, en Baja California se localizan dos campos: Las Tres Vírgenes en Baja California Sur y Cerro Prieto, en Mexicali, cerca de la frontera con Estados Unidos. A continuación, se presenta una tabla con la capacidad eléctrica actual de cada una de las plantas anteriormente mencionadas.

Campos del país	Capacidad Instalada
Cerro Prieto	570 MWe
Los Azufres	248 MWe
Los Humeros	94 MWe
Las Tres Vírgenes	10 MWe
Domo San Pedro	25 MWe

Tabla 1.2 Capacidad aproximada de cada planta en México. Datos obtenidos de CeMIEGeo al 2019.

La mayoría de las plantas son operadas por la CFE, sin embargo, el Domo de San Pedro ha sido puesto en marcha por la compañía privada Grupo Dragón. Para aprovechar estos recursos se tienen alrededor de 230 pozos de producción que van de los 1500 a los 3500 metros de profundidad [10] Se calcula que el gradiente geotérmico en México es de 25°C a 30°C por kilómetro de profundidad [11].

En cuanto a las zonas en México que tienen mayor potencial para aprovechar los recursos geotérmicos destaca el Eje Neovolcánico. Esta es la franja que se extiende de costa a costa en el territorio nacional y en el que se acumulan muchos volcanes que permanecen activos o tuvieron actividad reciente. De igual manera, la franja en la Península de Baja California figura por su capacidad, pues esta región se ve beneficiada por la colindancia entre la placa del pacífico y la placa norteamericana, cuya actividad favorece la actividad geotérmica del subsuelo [12].

México es un país con mucho potencial en cuanto a generación de energía con geotermia, gran parte del territorio sería útil para analizar y explotar este tipo de tecnología, sin embargo, aún no se le ha dado a la geotermia la relevancia que debería en el territorio nacional, y sobre todo la inversión necesaria, pues la geotermia es una fuente “inagotable” de energía y podría funcionar para alimentar energéticamente una buena parte del país.



Figura 1.4 Mapa de Recursos Geotérmicos en México. Extraído de [13]

1.4 Plantas geotermoeléctricas

Las centrales geotérmicas son las plantas encargadas de convertir la energía geotérmica en electricidad. Los yacimientos geotérmicos son una fuente confiable para obtener vapor de proceso y energía térmica para calefacción o para generar energía motriz en una turbina de vapor. Las centrales geotermoeléctricas se caracterizan por garantizar una producción constante de potencia eléctrica, debido al recurso comprobado de energía térmica en las cavidades de la tierra donde se instala la central.

Las centrales geotérmicas son similares a las centrales termoeléctricas de turbina de vapor, solo que, en lugar de crear el calor por medio de combustibles fósiles, se obtiene de yacimientos en el subsuelo. Con el vapor extraído del interior de la Tierra se acciona una turbina de vapor acoplada a un generador eléctrico, y así se genera electricidad.

Entonces, estas plantas además de operar con una fuente de energía renovable, dado que la energía calorífica al interior de la Tierra es inagotable, también operan con un alto factor de planta, el cual se refiere a la relación entre la energía eléctrica producida por una central eléctrica, durante un intervalo de tiempo determinado (generalmente un año), y la energía que habría producido si dicha central eléctrica hubiese trabajado sin intermitencias y a su máxima potencia, el cual generalmente se expresa en porcentaje. Es así como el alto factor de planta se justifica debido a que el calor al interior de la Tierra se encuentra disponible todo el tiempo, lo que las convierte en ideales para generar energía en esquema base, lo cual se explicará más adelante en este capítulo.

1.4.1 Clasificación de las plantas geotermoeléctricas

Se pueden distinguir tres tipos de centrales geotérmicas de generación de electricidad cuya clasificación depende de la temperatura, la profundidad y la calidad del agua o vapor extraídos.

- Centrales geotérmicas a contrapresión
- Centrales geotérmicas a condensación
- Centrales geotérmicas de ciclo binario

1.4.1.1 Centrales geotérmicas a contrapresión

También conocido como Ciclo con turbina a boca pozo. Este tipo de ciclo es el que comúnmente se utiliza cuando el campo geotérmico se comienza a explotar, debido a que los equipos que utiliza para funcionar son pocos en comparación con otras plantas de generación. Se trata de las centrales geotérmicas más simples.

El principio que rige este tipo de ciclo es que el vapor que activa las turbinas a contrapresión es liberado directamente de la turbina a la atmósfera. Solo necesitan de tres equipos principales: un separador que mediante gravedad y por las distintas densidades de fases, separe el vapor del líquido, pues es indispensable mandar vapor seco a la turbina y una turbina con un silenciador por el cual se expulsará el vapor después de pasar por ésta. La siguiente figura ilustra mejor el funcionamiento y los componentes principales de una planta a contrapresión.

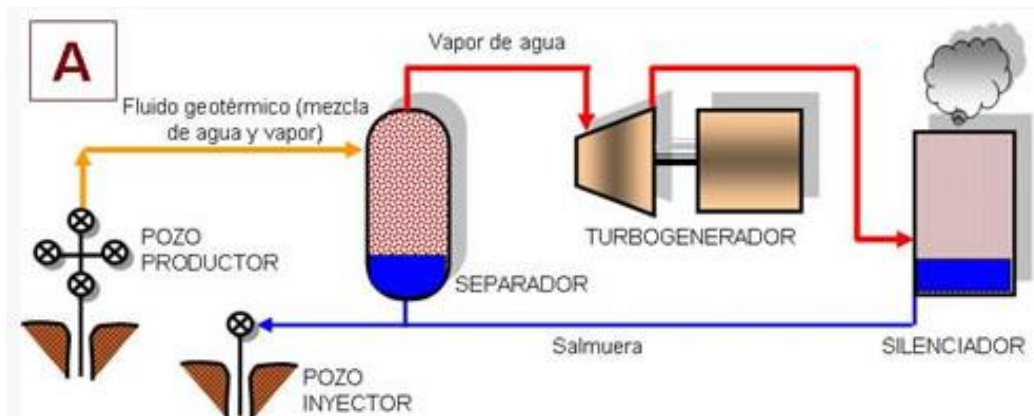


Figura 1.5 Representación del ciclo a contrapresión. Imagen obtenida de Revista.unam.mx, Generación de electricidad de origen geotérmico, vol 8, 2007.

Como la descarga se hace directamente a la atmósfera, es necesario evaluar la composición del fluido geotérmico para así evitar contaminar el ambiente. El gas geotérmico más abundante es el vapor de agua, el cual es inofensivo, sin embargo, en áreas geotérmicas, el vapor también puede contener gases volcánicos, particularmente dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), cuyas emisiones deben monitorearse para no rebasar el límite permitido de partículas en el ambiente, pues pudiera ser perjudicial para la gente que operase en dicho lugar. Para el caso del CO_2 , el rango típico aceptable está

entre 4,000 y 10,000 mg/kg, y para el H₂S, el rango aceptable está entre 100 y 2,000 mg/kg (Aguilera, s.f.).

Además, debe garantizarse que el fluido geotérmico se encuentre ubicado en zonas cercanas a la instalación para evitar costos asociados a la construcción de infraestructuras de conexión a la red de transmisión.

Las plantas a contrapresión tienen el menor costo de inversión, sin embargo, se ve reflejado en una menor eficiencia, esto debido a la limitante de la presión a la cual saldrá el vapor, la cual sería la presión atmosférica.

1.4.1.2 Centrales geotérmicas a condensación

En este tipo de ciclo el vapor que se inyecta en la turbina no se libera a la atmósfera y se hace pasar por un condensador acoplado a ella, donde después de condensarse, es llevado a una torre de enfriamiento, donde alguna parte se pierde por evaporación. El fluido se utiliza posteriormente como agua de enfriamiento en el condensador.

Este tipo de planta es utilizado de manera más frecuente. A diferencia de la planta a contrapresión, el vapor en la turbina se condensa, por lo que se suma a los componentes un condensador y una torre de enfriamiento, lo que representaría una mayor inversión y tiempo de instalación de la planta, aunque también una mejor eficiencia.

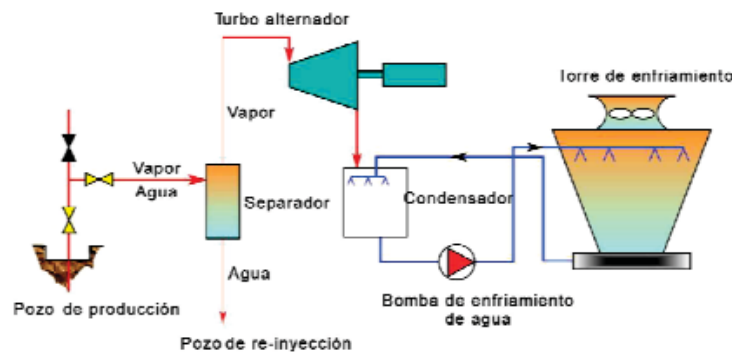


Figura 1.6 Esquema de un ciclo a condensación de planta termoelectrica. [14]

Una de las ventajas de la planta a condensación es que ahorra el recurso geotérmico, pues se encuentra recirculando, lo que evita que haya un mayor desperdicio de éste, y es así como controla las reservas del fluido geotérmico en el pozo a largo tiempo, pues las plantas a contrapresión consumen el doble de vapor por kWh producido.

Una de las ventajas principales de este tipo de planta sobre las de contrapresión es el aumento de potencia por las presiones volumétricas de operación, así como que el recurso geotérmico se condensa, lo cual permite que pueda reinyectarse al pozo de extracción, lo que a largo plazo prolongará la vida útil de éste. Según datos del Consulado europeo de la Energía Geotérmica, una planta a contrapresión consume el doble de vapor kWh producido. [15]

1.4.1.3 Centrales de Ciclo Binario

Las centrales geotérmicas de Ciclo Binario son las de desarrollo más reciente. Este tipo de centrales se caracteriza por trabajar con temperaturas no muy elevadas, que van desde los 60 °C hasta los 220 °C. El ciclo binario, también conocido por las siglas ORC, suele trabajar con agua moderadamente caliente extraída de los pozos geotérmicos y en la superficie cede su energía térmica a un fluido secundario, que normalmente es un refrigerante con bajos pesos moleculares y puntos de ebullición inferiores al agua, capaces de vaporizarse y operar una turbina de vapor.

Este tipo de central trabaja bajo el principio de operación de un ciclo Rankine, pues se trata de un circuito cerrado que absorbe el calor geotérmico, que, como consecuencia, lo evapora. Posteriormente, ese vapor se expande en una turbina conectada a un generador eléctrico. A continuación, el vapor se condensa con ayuda de un sistema de enfriamiento, el cual se comprime y se envía de vuelta al circuito con ayuda de una bomba.

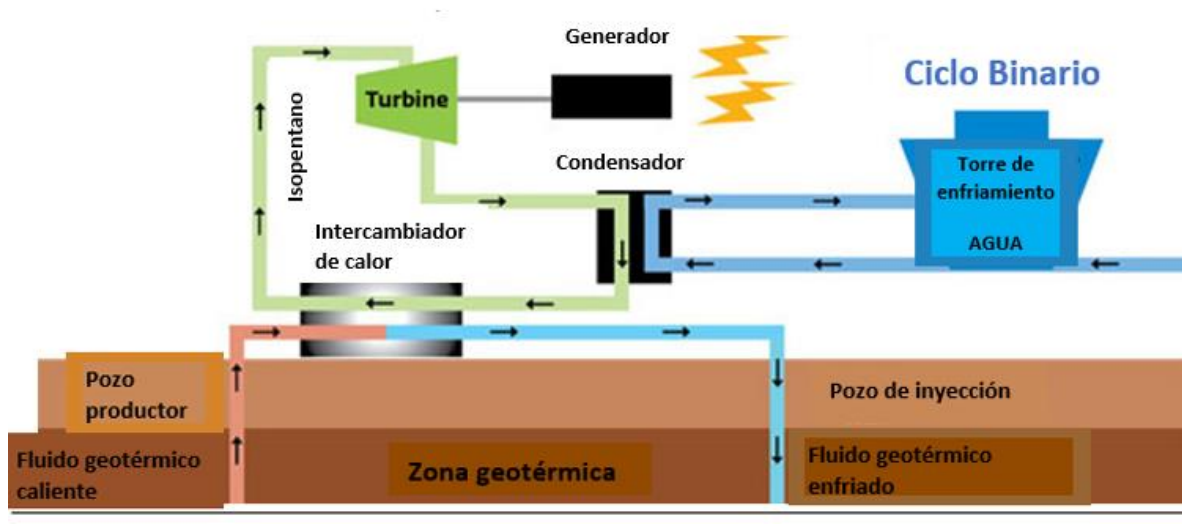


Figura 1.7 Representación de un ciclo binario, usando Isopentano como fluido de trabajo. Extraído de ingenieros.es, Primera planta geotérmica de alta entalpía en España, 2012

Otra configuración de las plantas de ciclo binario trabaja con el Ciclo Kalina, el cual funciona con una mezcla de agua y amoníaco, como fluido binario. Su objetivo es reducir la irreversibilidad del ciclo, debido a que, al contener dos fluidos distintos, la destrucción exérgica en los intercambiadores es menor, esto porque la evaporación de la mezcla de dos sustancias tiene un intervalo de temperaturas, mientras que en un fluido monocomponente tendrá una temperatura constante, lo que ocasiona que mejore la eficiencia total del ciclo. Se trata de encontrar un porcentaje adecuado de ambos fluidos para mejorar el rendimiento. Su principal desventaja es que es considerablemente más complejo que el ORC convencional, al contener una mezcla de sustancias como fluido de trabajo, por lo que será necesario un mezclador, lo que recae en un mayor costo de inversión, operación y mantenimiento.

En un estudio hecho por Fiaschi, et al (2017) [16], se determinó que los ciclos Kalina suelen ser más eficientes como convenientes económicamente cuando se trabaja con ciclos de baja entalpía (120°C), esto debido a que por la mezcla de sustancias, se logra incrementar la potencia de salida hasta en un 42%, pero para un caso de media entalpía, el costo unitario de generación suele incrementarse en un 3% cuando se usa el ciclo Kalina.

1.4.2 Condiciones de operación en los sistemas geotérmicos.

Existen distintos tipos de sistemas geotérmicos, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- I. Sistemas Hidrotermales
- II. Roca Seca Caliente
- III. Geopresurizados
- IV. Magmáticos

En cuanto a los sistemas hidrotermales, estos se encuentran formados por una fuente de calor, agua en estado líquido o vapor y la roca donde se almacena el fluido. Actualmente los sistemas hidrotermales son los únicos sistemas geotérmicos que se explotan de manera comercial, por lo que serán los únicos que se analicen en este punto.

En cuanto al estado del fluido, se clasifica de la siguiente manera:

Vapor dominante: Sistema de alta entalpía, generalmente de vapor seco. Ejemplos de plantas que trabajan con esta condición son The Geysers (USA), Larderello (Italia).

Líquido dominante: Sistema de alta entalpía que trabaja con salmuera. Opera a temperaturas mayores de 200 °C. Son más comunes que las anteriores. Algunos ejemplos son Cerro Prieto (México), Tiwi (Filipinas), etc.

Líquido dominante: Sistema de baja entalpía, opera en temperaturas de entre 100°C a menos de 200°C. Son las plantas más abundantes que existen. Ejemplos: Heber (USA), Yangbajing (China), etc [17].

Las condiciones de operación dependen de la clasificación del recurso geotérmico, el cual puede encontrarse en los siguientes rangos:

- Alta entalpía 200°C -300°C, generalmente usado en la generación de energía eléctrica.
- Media entalpía 150°C -200 °C, se utiliza en ciclos binarios y/o uso directo.
- Baja entalpía <150°C, uso directo [18].

A continuación, se presenta una tabla que determina cómo se operan generalmente los distintos tipos de plantas geotermoeléctricas.

	Temperatura	Estado del fluido
Plantas a contrapresión	> 150°C	Líquido dominante
Plantas a condensación	> 200°C	Vapor dominante
Plantas de ciclo binario	> 65°C	Líquido dominante (baja entalpía)

Tabla 1.3 Condiciones comunes de operación de plantas geotermoeléctricas.

1.4.3 Potencias o capacidad

La tabla siguiente plasma la información de las más grandes plantas geotermoeléctricas del mundo, en cuanto a capacidad y el tipo de configuración que presentan.

Planta	País	Capacidad [MW]	Tipo de yacimiento	Tipo de planta
The Geysers	USA	900 dividido en 18 plantas	Vapor seco y líquido dominante	Contrapresión y condensación
Larderello	Italia	769 dividido en 34 plantas	Vapor Seco	Contrapresión
Cerro Prieto	México	570	Líquido dominante	Condensación, doble flash
Makban	Filipinas	458 dividido en 6 plantas	Líquido dominante	Ciclo binario, condensación
Calenergy Generation's Salton Sea	USA	340	Vapor seco	Contrapresión
Hellisheidi	Islandia	303	Líquido dominante	Condensación
Tiwi	Filipinas	289 dividido en 3 plantas	Líquido dominante	Condensación, contrapresión
Malitbog	Filipinas	232.5	Vapor húmedo	Condensación
Wayang Windu	Indonesia	227	Vapor húmedo	Condensación

Tabla 1.4 Capacidad de plantas a nivel mundial. Información obtenida de [19]

Algunos datos generales de estas plantas que se pueden mencionar son, la eficiencia energética es baja, va del 10 al 23%, aproximadamente, debido a que el fluido geotérmico se encuentra a bajas temperaturas, en comparación con las plantas que operan con calderas de vapor.

En cuanto al factor de planta, el cual se define como el cociente entre la energía real generada por una central eléctrica durante un periodo de tiempo; generalmente anual; y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese mismo periodo, de una geotermoeléctrica, ronda en más del 90%, pues el recurso no depende de condiciones climáticas o determinado momento del día, todo el tiempo se encuentra disponible, lo que la convierte en una opción muy productiva.

1.4.4 Tipos de yacimientos geotérmicos

Un yacimiento geotérmico es una zona del subsuelo cuyo calor se puede aprovechar de forma económicamente rentable. Para que un yacimiento funcione se debe considerar que es necesario hacer una perforación relativamente profunda, además de que se necesita de un fluido que la transporte [20].

Uno de los factores principales para su clasificación son las temperaturas que manejan, lo que determinará su posible aplicación, por lo tanto, los yacimientos pueden dividirse en cuatro tipos distintos:

- **De alta temperatura:** Proporcionan suficiente calor para producir energía eléctrica. Generalmente se encuentran a más de 150°C.
- **De temperatura media:** Este tipo de yacimiento presentan una temperatura inferior al anterior, pero de igual manera efectiva para la generación eléctrica. Por lo general, este tipo de yacimiento va de los 100°C a los 150°C.
- **De baja temperatura:** Los usos de este tipo de yacimiento ya son más limitados y suelen enfocarse a sistemas de calefacción urbanos o en procesos industriales. Su temperatura va desde los 30°C hasta los 100°C.
- **De muy baja temperatura:** Suelen ser útiles para la aplicación de bombas de calor. Las temperaturas de dichos yacimientos suelen ser menores a los 30°C y estos pueden hallarse prácticamente en cualquier lugar, pues la Tierra, independientemente del lugar, cuenta con un gradiente de temperatura.

1.4.4.1 Yacimientos de vapor seco

Al hablar de yacimientos de vapor seco, nos referimos a que el fluido tiene una alta temperatura, y se encuentra en una fase gaseosa y está constituida por una mezcla de vapor de agua y gases.

En este caso el control de flujo del vapor para responder a las fluctuaciones en la demanda energética es más fácil, ya que el fluido que produce solo se encuentra en una fase, por lo que la presencia de una fase líquida en los equipos no sería posible. Las plantas de vapor seco se utilizan para producir energía de yacimientos de vapor dominante. En este caso el vapor saturado o ligeramente sobrecalentado se envía directamente a las turbinas. El vapor húmedo se condensa a la salida, para regresarse al yacimiento a través de pozos de inyección.

1.4.4.2 Yacimientos de roca caliente.

Dentro de los yacimientos geotérmicos de alta temperatura figuran los yacimientos geotérmicos llamados de “roca seca caliente”, los cuales se explotan mediante las llamadas técnicas de estimulación de yacimientos geotérmicos (EGS: *Enhanced Geothermal System* o en español, Sistema Geotérmico Mejorado). También se denominan sistemas conductivos, por la manera en la que el calor es extraído de la tierra.

Este tipo de yacimiento consiste en una masa de roca profunda en donde se hace la fracturación y circulación de fluidos para crear un yacimiento geotérmico, cuya explotación sea viable. En este caso hay una zona bajo la tierra, a profundidad no excesiva, con materiales o piedras calientes en seco. Por lo tanto, se inyecta agua por una perforación y ésta sale caliente por otra, aprovechando así el calor, donde con ayuda de un intercambiador se vuelve a inyectar para la conservación del pozo. Este se podría considerar como uno de media entalpía donde las temperaturas podrían rondar entre los

100 °C y los 150°C [21]. Los cuales podrían usarse como prototipos y para potencial eléctrico directo.

1.4.4.3 Yacimientos de vapor dominante.

Como su nombre lo dice, se trata de un sistema de alta entalpía que mayoritariamente se compone de vapor seco, aunque en una pequeña cantidad también se encuentra agua. Algunos ejemplos de plantas que operen con este tipo de yacimientos son The Geysers en E.U.A. y Larderello en Italia.

1.4.4.4 Yacimientos de líquido dominante

En este caso los yacimientos suelen dividirse en dos tipos:

- Líquido dominante de alta entalpía. Con temperaturas que van desde los 200 hasta más de 300°C. Algunos ejemplos de campos que trabajan así son: Cerro Prieto en México y Tiwi en Filipinas.
- Líquido dominante de baja entalpía. Presentan temperaturas que van de los 100 a los 200°C. Algunos ejemplos de campos que trabajan así son: Heber en E.U.A. y Yangbajin en China.

Ambos trabajan con salmuera, siendo más abundantes en proporción los de baja entalpía, comparado con los de alta entalpía.

Estos suelen ser los más comunes de hallar y los más útiles, pues dependiendo de las condiciones de presión y temperatura, estos sistemas pueden producir agua caliente, mezclas de agua y vapor, vapor, vapor húmedo e incluso en algunos casos, vapor seco [22].

1.5 Energía geotérmica para carga base

La energía geotérmica tiene múltiples beneficios, muchos provenientes de su naturaleza renovable y exenta de combustibles fósiles, así como su habilidad de proporcionar energía de carga base y fiable a un costo relativamente bajo. Una vez que una planta geotermoeléctrica es instalada, la producción eléctrica suele ser constante y estable, usualmente durante varias décadas, a costos competitivos con otras opciones de generación de carga base, así como el carbón vegetal. El desarrollo de un recurso local de energía renovable brinda la oportunidad de tener más fuentes de generación de energía y, de esta manera, reducir el riesgo del alza de precios en un futuro debido a los constantes aumentos de costo de los combustibles fósiles.

En nuestro país, una de las alternativas tecnológicas es generar la energía eléctrica lo más cerca posible al lugar de consumo, esto para asegurar, por un lado, el suministro oportuno

y de calidad de la energía eléctrica, y por el otro, el ahorro y el uso eficiente de los recursos naturales. A esta modalidad de generación eléctrica se le conoce como generación in situ, o más comúnmente, como generación distribuida (GD) [23]. Algunos de los arreglos tecnológicos más usuales para la GD son la carga base y la carga punta.

La generación de carga base se utiliza para generar energía eléctrica en forma continua; opera en paralelo con la red de distribución; puede tomar o vender parte de la energía, y usa la red para respaldo y mantenimiento [24]. Se trata del nivel mínimo de demanda eléctrica durante un período de tiempo. La demanda eléctrica en carga base es cubierta en mayor parte por centrales de potencia invariable. Y el resto de demanda se satisface mediante generación despachable³ y la reserva operativa⁴.

Es importante mencionar que, en la República Mexicana, la distribución eléctrica se divide en regiones tarifarias y éstas van cambiando, dependiendo del día de la semana, la hora y el mes en el que nos encontremos. Dichas regiones se dividen en las siguientes:

- BCS
- BC
- Noroeste
- Norte
- Golfo Norte
- Jalisco
- Bajío
- Golfo Centro
- Centro Occidente
- Centro Sur
- Valle de México Norte
- Valle de México Centro
- Valle de México Sur
- Centro Oriente
- Sureste
- Oriente
- Peninsular

³ La generación despachable se refiere a aquellas centrales que pueden ser utilizadas según lo soliciten los gestores de la red eléctrica, esto en base a las exigencias del mercado, donde se puede encender, apagar y regular la potencia según se demande (EnelGreenPower, 2022).

⁴ La reserva operativa es la rodante del sistema, más la generación que puede ser conectada en un tiempo determinado, más la carga que puede ser interrumpida dentro del mismo periodo de tiempo (CENACE, 2022).



Figura 1.8 Regiones tarifarias y los estados de México, imagen extraída de www.dof.gob.mx

La tabla siguiente especificará en promedio los horarios de las tarifas en carga base que corresponden a cada uno de ellos en las distintas regiones. Podemos observar que la carga base abarca principalmente las horas de madrugada y parte del día y la tarde. Se pondrá como ejemplo la región Jalisco, que es donde se busca instalar y probar el ciclo binario, el cual se describirá mejor en el capítulo 3 de esta tesis.

Región	Temporada del año	Día de la semana	Horario
Jalisco	Primavera	Lunes a viernes	0:00-6:00
		Sábado	0:00-7:00
		Domingo y festivo	0:00-19:00 23:00-24:00
	Verano	Lunes a viernes	1:00-6:00
		Sábado	1:00-7:00
		Domingo y festivo	0:00-19:00
	Otoño	Lunes a viernes	0:00-6:00
		Sábado	0:00-7:00
		Domingo y festivo	0:00-19:00 23:00-24:00
	Invierno	Lunes a viernes	0:00-6:00
		Sábado	0:00-8:00
		Domingo y festivo	0:00-18:00

Tabla 1.5 Horarios de carga base en distintas regiones eléctricas del país. Obtenido de cfe.mx el día 20/08/21

1.6 Energía geotérmica para carga en punta.

En cuanto a la carga en punta, se utiliza para suministrar la energía eléctrica en periodos punta, con lo que disminuye la demanda máxima del consumidor, ya que el costo de la energía en este periodo es el más alto. Estos periodos suelen ser en la noche, cuando se utiliza más energía, generalmente.

En la siguiente tabla se muestran los días, horarios y regiones en los que se aplica la carga en punta. Como se mencionó anteriormente, estas tarifas ocurren desde que empieza a anochecer hasta las 22:00 horas aproximadamente.

Región	Temporada del año	Día de la semana	Horario
Jalisco	Primavera		19:00-22:00
	Verano	Lunes a viernes	20:00-22:00
	Otoño		19:00-22:00
	Invierno	Lunes a viernes	18:00-22:00
		Sábado	19:00-21:00

Tabla 1.6 Carga punta en distintas regiones del país. Información obtenida de cfe.mx el día 20/08/21

La energía geotérmica tiene una ventaja sobre muchas formas renovables de generación de energía, pues cuenta con un alto factor de planta. Una planta geotermoeléctrica se caracteriza por trabajar las 24 horas del día, debido a que la fuente de calor se encuentra en la tierra y ésta nunca deja de operar, sin importar las condiciones climáticas ni la hora, es así como, el factor de planta de una geotermoeléctrica ronda entre el 90 a 95%. Por esta razón es que la geotermia se ve como una buena opción de generación de energía, pues puede satisfacer la demanda de carga en cualquier momento del día, sin importar las circunstancias o condiciones.

1.7 Generación Distribuida en México

La industria eléctrica ha cambiado y se ha acoplado a las necesidades de la población a través de los años. Anteriormente, la industria eléctrica se fundamentó en la generación en el sitio de consumo. Después, como parte del crecimiento demográfico y de la demanda de bienes y servicios, evolucionó hacia el esquema de generación centralizada, precisamente porque la central eléctrica se encontraba en el centro geométrico del consumo. Con el tiempo, la generación eléctrica se estructuró como se conoce hoy, es decir, con corriente alterna y transformadores, lo que permite llevar la energía a cualquier punto alejado del centro de generación.

El objetivo principal en este momento es generar energía eléctrica lo más cercano posible al lugar del consumo, incorporando las ventajas de la tecnología moderna y el respaldo de la red del sistema eléctrico, para compensar si surgiera algún requerimiento adicional de compra o venta de electricidad. A esta modalidad se le conoce como generación distribuida (GD). Se puede resumir entonces que la generación distribuida es la generación o almacenamiento de la energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de carga, con la opción de interactuar con la red eléctrica mediante una interconexión.

Actualmente se está apostando por la GD, debido a que mientras más cercana se encuentre la generación eléctrica del punto de consumo, menos pérdidas por transmisión habrá, pudiéndose instalar plantas a pequeña escala que puedan suministrar de energía eléctrica una región en específico. Otro punto importante para mencionar es que la generación distribuida se está enfocando en distintas fuentes de energía limpia, como lo es la geotermia.

En México, el esquema de la GD se encuentra limitado a 0.5 MW de generación y no se ha visto afectado por las nuevas políticas energéticas emprendidas para reformar la Ley de la Industria Eléctrica, además de que se ha presentado un crecimiento constante en los últimos años, contando con un potencial para integrar a más de 40 millones de usuarios bajo alguno de sus esquemas [25].

Hasta el primer semestre de 2022 se contaba con una capacidad instalada de Generación Distribuida en el país de 2,307 MW, con un total de 300,624 contratos de interconexión. A nivel nacional destacan algunos estados como lo es Jalisco (349.99 MW), Nuevo León (248.05 MW) y Chihuahua (154.58 MW), entre las principales entidades con mayor presencia con este esquema de generación.

Estado	Capacidad Instalada (MW)	Contratos
Tlaxcala	3.75	315
Campeche	13.20	1,707
Chiapas	14.68	1,815
Tabasco	14.96	1,633
Oaxaca	15.95	1,804
Hidalgo	17.48	1,561
Zacatecas	19.51	2,256
Guerrero	20.53	2,711
Baja California Sur	23.63	1,633
Quintana Roo	31.50	4,593
Morelos	36.57	5,714
Tamaulipas	38.49	3,983
Colima	40.48	7,107
Puebla	40.99	4,982
Durango	41.01	4,528
Nayarit	43.28	6,476
San Luis Potosí	44.30	6,381
Querétaro	45.61	7,360
Veracruz	57.63	7,247
Sinaloa	67.08	4,796
Aguascalientes	70.37	7,145
Baja California	72.78	11,252
Sonora	95.91	10,311
Coahuila	96.56	12,390
Yucatán	98.91	13,813
Michoacán	102.04	15,127
Ciudad de México	117.09	15,013
Guanajuato	134.25	14,763
Estado de México	136.28	11,063
Chihuahua	154.58	23,693
Nuevo León	248.05	32,577
Jalisco	349.99	54,875

Tabla 1.7. Generación distribuida en México. Extraído de [Estadísticas sobre las Solicitudes de Interconexión de Centrales Eléctricas de Generación Distribuida | Comisión Reguladora de Energía | Gobierno | gob.mx \(www.gob.mx\)](#)

Existe una gran diversidad de tecnologías que permiten generar electricidad de manera descentralizada, a continuación, se mencionan las más relevantes con capacidades menores a 0.5 MW, según la CRE (Comisión Reguladora de Energía), así como su capacidad instalada en el país:

- **Solar Fotovoltaica.** 2,290.58 MW. Representa el 99.27%
- **Biogás.** 12.73 MW. Representa el 0.5519%
- **Biomasa.** 1.96 MW. Representa el 0.0850%
- **Cogeneración.** 1.36 MW. Representa el 0.0589%
- **Hidroeléctrica.** 0.009 MW. Representa el 0.0004%
- **Diésel / Combustóleo.** 0.072 MW. Representa el 0.0031%
- **Gas.** 0.077 MW. Representa el 0.0034%
- **Eólica.** 0.63 MW. Representa el 0.0273%

Por el éxito que ha presentado la GD, se han desarrollado programas locales basados en el desarrollo de este tipo de proyectos. Como en la Ciudad de México, donde se piensa suministrar con energía solar al mercado de la Central de Abastos, con lo cual se busca obtener un ahorro del 15% en el gasto anual de energía, equivalente a reducir 13,852 toneladas de CO₂ al año. [26]

El impulso de este tipo de proyectos es la clave para que el país cree una incidencia de cambio a nivel local y se pueda contribuir a fomentar esquemas de generación más flexibles y descentralizados, lo cual permita aprovechar los recursos renovables y avanzar en el propósito de la transición energética que México necesita. Sin duda el reto más grande a vencer es con relación a los aspectos regulatorios y el cambio en el diseño de los mercados eléctricos, que permitan bajar las barreras y darle entrada a las tecnologías que se vinculan con la GD.

1.7.1 ORC para generación distribuida operados con geotermia

Como se mencionó en el apartado anterior, la generación distribuida funciona como un almacenamiento o generación de energía a pequeña escala y cerca del lugar donde será aprovechada. La geotermia es un recurso natural con el que se cuenta en una gran parte del país, y que pudiera encajar perfectamente con el concepto de generación distribuida.

Anteriormente se habló sobre los tipos de plantas geotérmicas que existen mundialmente, y las características de su extracción y temperaturas de los recursos. La geotermia depende en gran medida de los pozos geotérmicos que se hagan para la extracción del recurso, los cuales tienen un gradiente de temperatura de entre 25 y 30°C, el cual incrementa si la zona es geotérmica. La ventaja de los ORC es que operan con un fluido de trabajo, el cual cuenta con una temperatura crítica significativamente menor que la del agua, fluido con el que se opera una planta Rankine convencional. Es así como el calor de la tierra actúa como la fuente térmica para evaporar el fluido de trabajo, el cual se utilizará para accionar la turbina del ciclo y, por lo tanto, se generará potencia eléctrica.

Una planta de ORC puede diseñarse para cubrir distintas capacidades energéticas, sin la necesidad de hacer pozos geotérmicos de muchos kilómetros de profundidad, pues puede trabajar con bajas entalpías, y pudiera funcionar para suministrar una pequeña región y hacerla energéticamente independiente. Como se mencionó anteriormente, mientras más profundo sea un pozo geotérmico, el gradiente de temperatura será mayor, dando la posibilidad de trabajar a alta entalpía, no obstante, la excavación de pozos resulta en una de las mayores inversiones en un proyecto geotérmico. Se estima que el costo de perforar un pozo geotérmico va de los 15 a los 40 dólares por pie de profundidad [27]. Los pozos geotérmicos tienen generalmente seis pulgadas de diámetro, y su profundidad puede ir desde los 200 hasta los 3500 metros, aproximadamente, razón por la cual suele frenarse el desarrollo de esta tecnología a grandes escalas.

Mundialmente, existen empresas que se dedican a diseñar y comercializar pequeños ciclos binarios, que servirían principalmente para el desarrollo de la generación distribuida a diferentes escalas. En la tabla a continuación se describen algunas de las empresas que existen en el mercado y que actualmente ya se encuentran comercializando este tipo de tecnología. En el capítulo 4 se ahonda más sobre este tema.

Empresa	Origen	Capacidades	Temperaturas	Fluido de trabajo	Eficiencia
Enogia	Francia	Unidades de 10 y 20 kW	Entre 80°C y 120°C	R245fa	Turbogeneradores con eficiencias entre 5 y 8%
Electratherm	E.U.A.	Unidades de 35 kW	77°C – 166°C	R245fa	NA
Zuccato	Italia	30 a 50 kW	95 – 160°C	R245fa	Turbinas radiales con 8.5% de eficiencia
Honeywell	E.U.A.	5 – 30,000 kW	60 - 300°C	R245fa	NA

Tabla 1.8 Empresas que distribuyen y fabrican ORC en el mundo.

1.8 Fuentes consultadas

- [1] World Resources Institute. (2017). C2ES. Obtenido de <https://www.c2es.org/content/international-emissions/>
- [2] Ritchie, H. (18 de Septiembre de 2020). Obtenido de <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>
- [3] MRNT 2022-2026, p. 33.
- [4] García, K. (21 de marzo de 2018). Capacidad de energía limpia llegará a 49% en el 2030. *El economista*, págs. <https://www.economista.com.mx/empresas/Capacidad-de-energia-limpia-llegara-a-49-en-el-2030-20180321-0162.html>.

- [5] Iberdrola. (05 de octubre de 2022). *iberdrola.com*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/lineas-negocio/proyectos-emblematicos/plantas-energia-solar-fotovoltaica-mexico#:~:text=Santiago%2C%20la%20planta%20fotovoltaica%20m%C3%A1s%20grande%20del%20mundo%20construida%20por%20Iberdrola&text=La%20compa%C3%B1a>
- [6] Brommer, M. (27 de enero de 2020). *2020 To become a milestone year for the global geothermal Energy Sector*. Obtenido de <https://www.lovegeothermal.org/2020-to-become-a-milestone-year-for-the-global-geothermal-energy-sector/>
- [7] Palomino, D. (04 de abril de 2019). *Qué es la energía geotérmica, sistemas de climatización y futuro*. Obtenido de <https://www.renovablesverdes.com/energia-geotermica-sistemas-climatizacion-futuro/>
- [8] SEMARNAT. (2015). *Geotermia: Fuente de energía renovable*. . Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/geotermia-fuente-de-energia-renovable#:~:text=La%20geotermia%20es%20la%20energ%C3%ADa,garantizar%20la%20sustentabilidad%20del%20recurso>
- [9] Juárez, U. (01 de junio de 2022). *energiaadebate.com*. Obtenido de <https://energiaadebate.com/buscan-mexico-y-francia-incrementar-eficiencia-energetica-en-geotermia/>
- [10] *cemiegeo.org*. (s.f.). Obtenido de <http://www.cemiegeo.org/index.php/geotermia-en-mexico>
- [11] Bert, G. H. (05 de 2011). *cre.gob.mx*. Obtenido de <https://www.cre.gob.mx/documento/2026.pdf>
- [12] Rodríguez, I. (22 de 07 de 2020). *Conexiones 365*. Obtenido de <https://www.conexiones365.com/nota/mirec/energias-renovables/recursos-geotermicos-oportunidad>
- [13] Santoyo, E., & Barragán, R. (Abril-Junio 2010). Energía Geotérmica. *Ciencia*, 40-51
- [14] Dickson, M., Fanelli, M., (2004) What is Geothermal Energy? International Geothermal Association, Bochum
- [15] European Geothermal Energy Council. (2009). *Geothermal Electricity and Combined Heat & Power*. Bruselas: Sixth framework programme.
- [16] Fiaschi, D., Manfrida, G., Rogai, E., & Lorenzo, T. (2017). *Exergoeconomic analysis and comparison between ORC and Kalina cycles to exploit low and medium-high temperature heat from twodifferent geothermal sites*. ResearchGate.
- [17] García, A., & Barragán, R. (2009). Situación y prospectiva de la energía geotermoeléctrica. *ai*, 49.
- [18] geotermia, D. d. (2007). *docplayer.es*. Obtenido de <https://docplayer.es/14627749-Energia-geotermica-division-de-geotermia-julio-2007.html>

- [19] Power technology. (11 de 11 de 2013). *power-technology.com*. Obtenido de <https://www.power-technology.com/analysis/feature-top-10-biggest-geothermal-power-plants-in-the-world/>
- [20] ICGC. (2011). *¿Qué es un yacimiento geotérmico? Tipos de yacimientos geotérmicos*. España.
- [21] Cataluña, I. C. (06 de 10 de 2022). *icgc.cat*. Obtenido de <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geotermia/Que-es-un-yacimiento-geotermico-Tipos-de-yacimientos-geotermicos#:~:text=Un%20yacimiento%20geot%C3%A9rmico%20es%20una,apr ovechar%20de%20forma%20econ%C3%B3micamente%20rentable.>
- [22] H. Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *¿Qué es la Energía Geotérmica?* Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.lis.edu.es/uploads/812fe7d1_d505_4825_9db3_8438d78a406c.PDF
- [23] CONUEE. (06 de 06 de 2014). *gob.mx*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/que-es-la-generacion-distribuida-estados-y-municipios>
- [24] Calderón Girón, L. R. (12 de 06 de 2007). *Mundohvacr*. Obtenido de <https://www.mundohvacr.com.mx/2007/06/la-generacion-distribuida-en-redes-e-instalaciones-electricas-2/#:~:text=%E2%80%A2%20Carga%20base.%20Se%20utiliza%20para%20generar%20energ%C3%ADa,respaldo%20y%20mantenimiento.%20%E2%80%A2%20Proporcionar%20carga%20en%2>
- [25] Díaz, S. G. (10 de 03 de 2021). *Generación Distribuida: La última trinchera energética*. Obtenido de pv-magazine-mexico: <https://www.pv-magazine-mexico.com/2021/03/10/generacion-distribuida-la-ultima-trinchera-energetica/>
- [26] Cahun, A. (18 de 02 de 2021). *xataka.com.mx*. Obtenido de <https://www.xataka.com/energia/cdmx-tendra-su-propia-planta-solar-36-mil-paneles-solares-central-abastos-produciran-energia-para-15-000-hogares>
- [27] HomeGuide. (23 de 05 de 2022). *homeguide*. Obtenido de <https://homeguide.com/costs/well-drilling-cost>

Capítulo II.

Sistemas ORC

El siguiente capítulo habla de las características principales de los Ciclos Rankine Orgánicos, se analizan las distintas configuraciones que existen en este tipo de ciclo, como son el ciclo simple, el regenerativo, con recalentamiento, flasheo simple y doble flasheo y trilateral. De igual manera se estudian distintos tipos de tecnologías de expansión, y se hace un recuento de las características de cada una de ellas para evaluar su mejor campo de aplicación.

Se aborda la selección del fluido de trabajo que se utilizará para el ciclo, con las características más representativas como son las propiedades físico-químicas (con su presión y temperatura críticas como una de las características más relevantes), los índices de seguridad ambiental, sus propiedades de estabilidad y compatibilidad con otros materiales, así como una pequeña comparación de dos alternativas potenciales. De la misma manera, se ahonda en el tema de las mezclas Zeotrópicas (mezclas formadas por dos o más componentes de diferente volatilidad) como una nueva alternativa para aumentar la eficiencia en los ORC.

Finalmente, se hace una introducción para el diseño de las tuberías y accesorios en el ciclo, y se hace referencia a las normas y códigos que se toman en cuenta para realizar dicha selección.

2.1 Plantas de generación de media y baja entalpía.

En los últimos años se está abriendo la posibilidad de ciclos que operen con medianas y bajas entalpías. DiPippo [28] indica que las configuraciones de plantas binarias son particularmente apropiadas para los recursos geotérmicos de media temperatura (120-150°C). Esta configuración de conversión de energía de tipo binario permite la explotación de recursos geotérmicos de baja temperatura bajo muchas variaciones dependiendo de las características técnicas para alcanzar mayores eficiencias en las plantas.

Los ciclos Binarios suelen dividirse en dos configuraciones:

- Ciclo Rankine Orgánico
- Ciclo Kalina

De los cuales ya se habló con más detalle en el capítulo 1, sobre todo de los ORC y su configuración. Como información adicional se puede agregar que los Ciclos Rankine Orgánicos son comúnmente aceptados como tecnología viable para convertir el calor de baja entalpía en energía eléctrica. Igualmente se trata de plantas versátiles debido a la libertad de poder elegir entre una gran variedad de fluidos de trabajo que se adapten mejor a las condiciones y necesidades de cada planta. Además, de que los ORC son diseñados para operar con poco mantenimiento.

El principio de la tecnología de los ORC fue establecido en 1826 por T. Howard [29], quien experimentó por primera vez con el éter como fluido de trabajo en un ciclo de energía. Así como el primer ejemplo de una planta moderna de ORC fue constituido por D'Amelio en 1936 cuya planta se basó en un ciclo simple de monocloroetano calentado por energía solar que alimentaba una turbina de impulso de una sola etapa.

En cuanto a los Ciclos Kalina se puede decir que a principios de la década de los 80's se propuso una nueva familia de ciclo termodinámicos de potencia utilizando una mezcla de amoníaco-agua ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) como fluido de trabajo, y esta configuración adoptó el nombre de su creador. Típicamente se utiliza una mezcla de 70% amoníaco y 30% de agua, aunque esto pudiera variar, de acuerdo con el diseño que se plantee. Entonces se forma una sustancia Zeotrópica, de las cuales se hablará más adelante, donde la evaporación y condensación tienen lugar en un rango de temperatura en lugar de una temperatura constante. Es necesario mencionar que una de las mayores desventajas de esta configuración es que el amoníaco suele ser un fluido que no es altamente compatible con ciertos materiales, de igual forma es inflamable, lo que obliga a que el mantenimiento sea más constante, así como que las medidas de seguridad de la planta sean más estrictas.

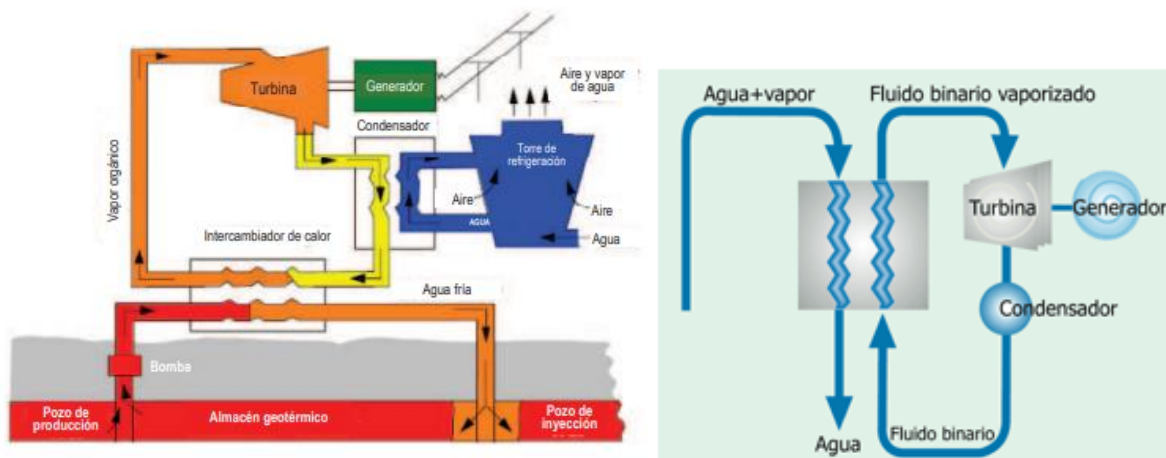


Figura 2.1 Diagrama de ORC y un Ciclo Kalina Fuente: Geothermal Energy Association e IGME

2.1.2 Configuraciones de las plantas ORC.

En este trabajo se desarrollará la ingeniería básica y de detalle de un ciclo binario bajo una configuración simple, debido a que el presupuesto asignado para el proyecto es limitado, donde uno de los objetivos primordiales es generar un modelo económico y funcional para la validación de la tecnología, no obstante, se presentarán otras posibles configuraciones con las que se puede mejorar la eficiencia del sistema, pero que implicarían una inversión de capital mayor.

Algunas de las ventajas que presentan los ORC se mencionan a continuación:

- Son apropiados para aplicaciones de baja temperatura.
- No se presenta una fase de mezcla durante la expansión, lo que representa un menor costo de mantenimiento y garantiza una expansión más confiable y larga.
- Puede ser compacta y automatizada, sin necesidad de contar con operadores.
- Cuentan con una configuración modular, lo cual genera que la instalación y el transporte sea más sencillo, reduciendo la huella ambiental.
- Diseño flexible, pues se cuenta con muchas opciones de fluido de trabajo que podrían optimizar la eficiencia, dependiendo de las condiciones de operación de la planta.

- No necesariamente necesitan agua para operar.
- Opción amigable con el ambiente, con menor cantidad de desechos.

El objetivo de crear distintas configuraciones del Ciclo Rankine es el incrementar la eficiencia térmica del mismo y que se acople mejor a los requerimientos de cada diseño.

2.1.2.1 Ciclo Simple

Este tipo de configuración es el más sencillo que existe y requiere un pequeño número de componentes: una bomba, un intercambiador de calor primario, una turbina y un condensador.

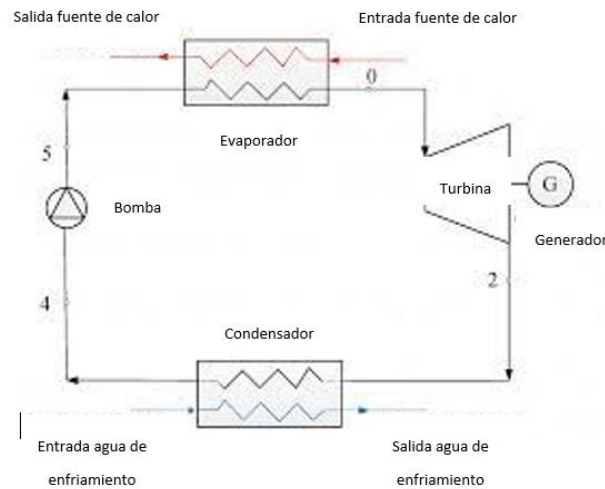


Figura 2.2 Configuración de una planta ORC de ciclo simple. [30]

El fluido de trabajo en estado líquido es extraído del condensador, donde después aumenta su presión con ayuda de la bomba de fluido de trabajo a su máxima presión del ciclo. Posteriormente, el fluido de trabajo entra en el intercambiador de calor o evaporador, donde aumenta de nuevo su temperatura debido a la fuente de calor, y se deja listo para ser introducido en la turbina, la cual está conectada al generador eléctrico y donde se realiza un proceso de expansión. Finalmente, el vapor extraído de la turbina entra en el condensador y el ciclo se repite.

Al tratarse de un ciclo simple, el diagrama T-s del ORC se vería de la siguiente manera:

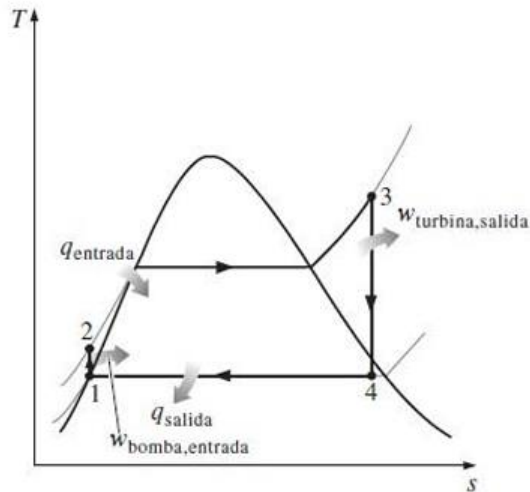


Figura 2.3 Esquema Ciclo Simple Ideal. [31]

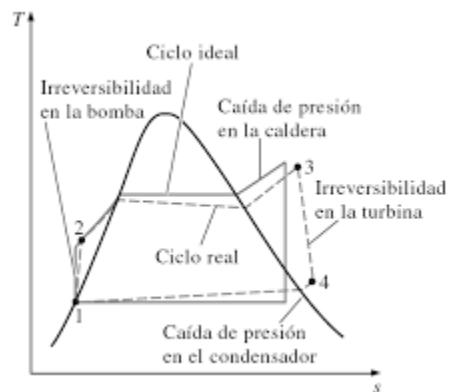


Figura 2.4 Esquema Ciclo Simple Real. (Cengel, 2012)

El Ciclo Rankine simple está conformado por cuatro procesos: dos isentrópicos y dos isobáricos. La bomba y la turbina son las que operan según procesos isentrópicos, adiabáticos e internamente irreversibles, mientras que la caldera y el condensador operan sin pérdidas de carga, y por lo tanto sin caídas de presión.

- Proceso 1-2: Compresión isentrópica en una bomba el fluido de trabajo en fase líquida mediante una bomba. Se aumenta la presión del fluido de trabajo hasta el valor de presión en caldera.
- Proceso 2-3: Adición de calor a presión constante en una caldera. En un primer tramo del proceso el fluido de trabajo se calienta hasta la temperatura de saturación, luego tiene lugar el cambio de fase líquido-vapor y finalmente se obtiene vapor sobrecalentado.

- Proceso 3-4: Expansión isentrópica en una turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador. Se realiza en una turbina de vapor y se genera potencia en el eje de esta.
- Proceso 4-1: Rechazo de calor a presión constante en un condensador, de forma que el fluido de trabajo alcanza el estado de líquido saturado. Se realiza en un condensador (intercambiador de calor), idealmente sin pérdidas de presión.

El ciclo real se lleva a cabo suponiendo que no existieran irreversibilidades en el sistema, cosa que no sucede.

2.1.2.2 Ciclo regenerativo

El ciclo regenerativo es muy similar al ciclo simple, a diferencia de que se agrega otro equipo al sistema, un recuperador de calor a la salida de la turbina. El objetivo de dicho recuperador de calor es aprovechar el vapor de la salida de la turbina para calentar un poco el condensado. Esto genera que aumente la temperatura media del fluido circulante, lo que significaría una mayor temperatura de entrada al intercambiador de calor y, por lo tanto, una mayor eficiencia del ciclo.

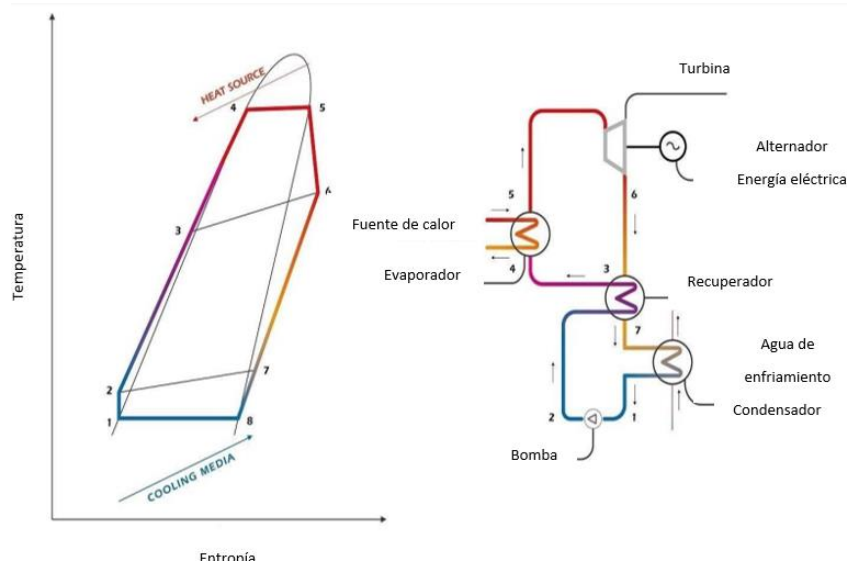


Figura 2.5 Esquema de un Ciclo ORC regenerativo. [32]

En la ilustración se puede observar que el fluido a la salida del condensador ya perdió una cantidad considerable de calor, ilustrándolo en color azul, sin embargo, después de pasar por el recuperador, el condensado eleva su temperatura, entrando con una mayor entalpía al evaporador, y entonces el ciclo vuelve a empezar, con una mayor eficiencia debido a que el delta de temperatura se incrementa con el precalentamiento del fluido.

2.1.2.3 Ciclo con recalentamiento

En el ciclo con recalentamiento, el vapor no se expande por completo en una sola etapa hasta la presión del condensador. Luego de expandirse parcialmente, el vapor se extrae de una turbina de alta presión y se recalienta a presión constante en el sistema intercambiador de calor y recalentador. Posteriormente, se devuelve ese vapor ahora a una turbina de baja presión para completar la expansión hasta la presión de salida. A continuación, se muestra un diagrama de su configuración.

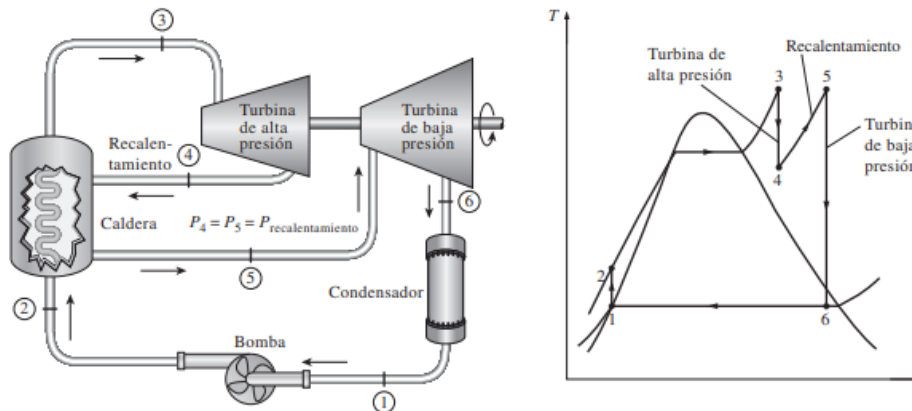


Figura 2.6 Configuración de un ciclo Rankine con recalentamiento. [33]

En la ilustración se puede observar cómo el proceso de recalentamiento incrementa en buena medida el trabajo del ciclo, lo que incrementaría de igual forma la eficiencia de éste.

Algunas consideraciones generales son:

- A la salida de la turbina de alta presión, el vapor generalmente está próximo a la línea de saturación.
- La temperatura tras el recalentamiento es generalmente igual o algo inferior a la temperatura de entrada en la primera etapa de la turbina

El rendimiento de un ciclo Rankine con recalentamiento aumenta conforme se incrementa el número de etapas de expansión y recalentamiento. Sin embargo, la mejora que trae consigo un segundo recalentamiento es aproximadamente la mitad de la que se introduce en el primer recalentamiento y la de un tercero, la mitad de lo que se obtiene en el segundo, lo que podría significar que no son necesarias tantas etapas de recalentamiento, pues el beneficio no es tan significativo después del primer recalentamiento, y tendría que evaluarse el costo/beneficio del diseño que se elija.

2.1.2.4 Ciclo con flasheo simple y doble flasheo

Este tipo de plantas se utiliza principalmente cuando la reserva geotérmica está principalmente constituida por líquido dominante. Cuando el vapor es de baja calidad y se compone en mayor medida por agua, no puede ser inyectado directamente. Entonces, el

fluido se lleva desde el pozo hasta un separador ciclónico, donde se separa la mezcla en vapor y líquido. A este proceso se le conoce como flasheo. Luego desde el separador ciclónico, el vapor es conducido hacia el conjunto turbina generador.

El líquido que sale del separador suele ser salmuera muy concentrada, donde quedan contenidas sales minerales y otros sólidos disueltos. Se vuelve a reinyectar al pozo y el proceso sigue.

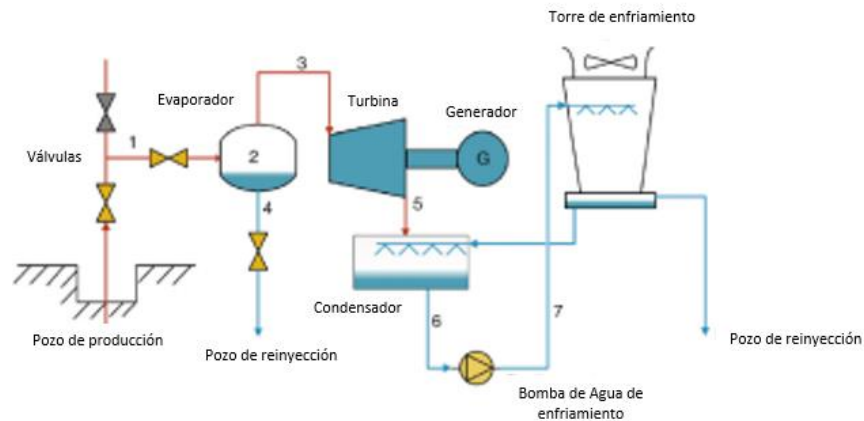


Figura 2.7 Representación de un ciclo a condensación con un flasheo. [34]



Figura 2.8 Diagrama T-S de un ciclo con flasheo simple. [35]

También existe la posibilidad de que se opere con dos flasheos, esto en el caso de que el vapor de baja calidad esté sometido a presiones suficientemente altas. En esta configuración el proceso es igual al anterior, a excepción de que ahora existen dos procesos de flasheo que alimentan a una turbina de baja presión y a una turbina de alta presión. Al hacer uso de ambas turbinas, es posible que el generador produzca mayor potencia, lo que resultaría en una mejor eficiencia de la planta.

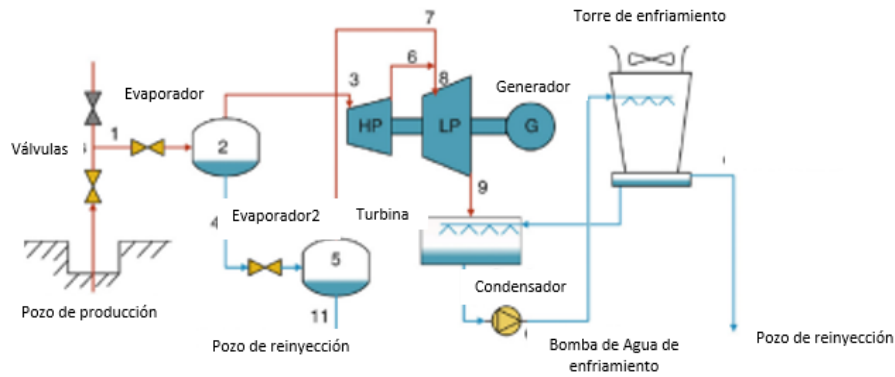


Figura 2.9 Representación de un ciclo a condensación con doble flasheo. Ibis.

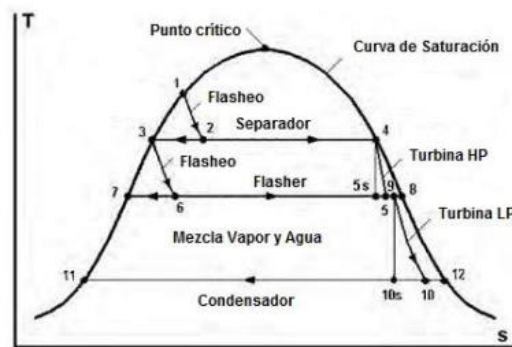


Figura 2.10 Diagrama T-S de un ciclo con doble flasheo. Ibis.

2.1.2.5 Ciclo Trilateral o TLC

El ciclo TLC o Trilateral (triangular) es muy similar a un ciclo flash, pero en lugar de almacenar el fluido de trabajo para producir vapor saturado y líquido saturado, el fluido de trabajo es enviado en su estado bifásico directamente al expansor. La evaporación completa y posterior sobrecalentamiento del fluido primario es omitida con la finalidad de eludir el *pinch point* o punto en el que existe la menor diferencia de temperaturas entre el fluido primario y el secundario. Esto produce un rendimiento termodinámico más bajo que un ORC simple, pero aprovecha en mayor medida el calor de la fuente térmica, por lo que se produce una mayor eficiencia del proceso. [36]

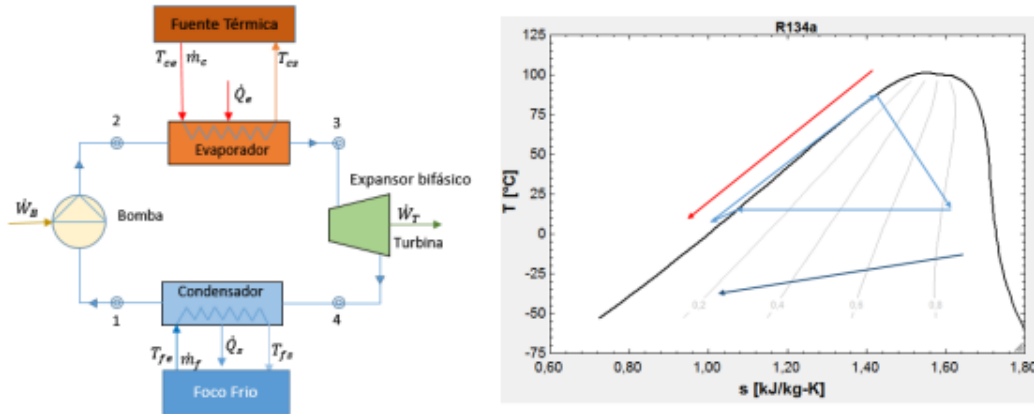


Figura 2.11 Diagrama de ciclo trilateral. (Sampedro, 2017)

Uno de los problemas principales que enfrenta un ciclo trilateral es que su turbina debe trabajar constantemente en zona bifásica. Esto puede ocasionar a mediano plazo un deterioro en los álabes, por lo que el mantenimiento es una pieza importante en este ciclo. Los ciclos trilaterales suelen trabajar con diferentes tipos de expansores, por ejemplo, de tornillo, de paletas, etc.

Como conclusión, en la tabla siguiente se enuncia cómo es que mejora la eficiencia con cada una de las configuraciones del Ciclo Rankine Orgánico.

Tipo de ciclo ORC	Eficiencia
Ciclo simple	8%
Ciclo regenerativo	12.4% ⁵
Ciclo con recalentamiento	11%
Ciclo con flasheo	9% ⁶
Ciclo TLC	13%

Tabla 2.1 Comparación de eficiencias utilizando distintas configuraciones del ORC.

2.2 Estado del arte de las plantas ORC

2.2.1 Ciclos supercríticos

Un ciclo supercrítico o transcrito se caracteriza por trabajar con una presión máxima superior a la crítica. El fluido de trabajo se calienta desde líquido subenfriado hasta vapor sobrecalentado con una transición por encima del punto crítico. El cambio de fase es gradual y todas sus propiedades físicas y termodinámicas varía sin discontinuidades cuando se lleva a cabo la etapa de absorción de calor.

Estos ciclos suelen ser interesantes porque pueden conseguir rendimientos mayores que un ciclo subcrítico si se trabaja con una fuente de calor con capacidad calorífica finita. Sin embargo, se deben hacer una selección correcta del fluido de trabajo y la correcta

⁵ [37]

⁶ [38]

optimización de los parámetros del ciclo. A pesar de poder conseguirse mejoras en los rendimientos, los ciclos supercríticos requieren de equipos más caros debido a las altas presiones a las que deben operar, lo que se traduce en una mayor inversión. Principalmente, se necesitan bombas centrífugas multietapa, las cuales pudieran consumir hasta 30% de la potencia generada en el ciclo. De la misma manera, las paredes del intercambiador de calor deben ser mayores, en comparación con los otros ciclos.

Los ciclos supercríticos han demostrado ser útiles para aplicaciones de energía geotérmica pues la diferencia de temperatura en la fuente de calor es compatible con la forma de la transición supercrítica. De hecho, con un buen diseño han demostrado ser muy estables al cambiar de operación supercrítica a subcrítica en caso de que fuese necesario.

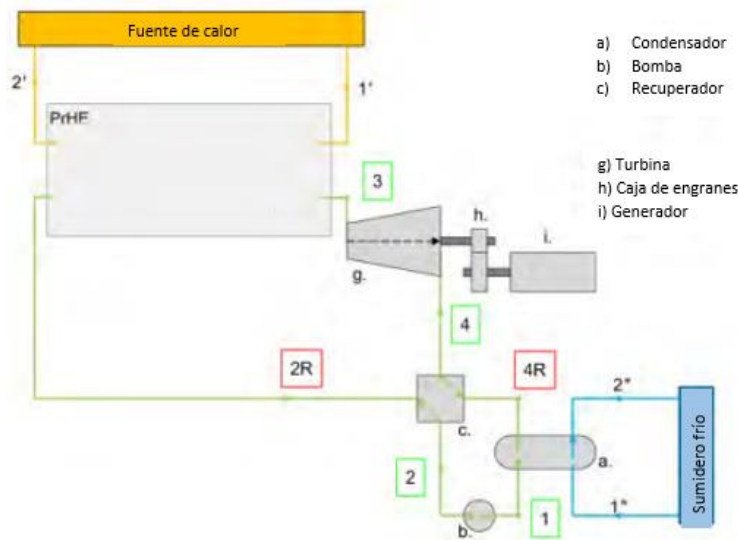


Figura 2.12 Componentes de un Ciclo supercrítico. [39]

2.2.2 Tecnologías de expansión

Los Ciclos Rankine Orgánicos tienen la flexibilidad de poder elegir los fluidos de trabajo y máquinas de expansión, como un grado más de libertad en el diseño. Un expansor es un tipo de máquina que convierte la energía cinética procedente del flujo de trabajo, en energía mecánica. Generalmente el fluido de trabajo se encuentra en fase gaseosa, pero pudiera encontrarse en fase líquida de igual manera. Sin embargo, los ORC trabajan especialmente con vapor.

La selección de un expansor adecuado para determinado diseño de un ORC es de gran importancia para evitar reducciones en la eficiencia. La selección depende de la aplicación del ciclo, las condiciones de operación (temperatura, presión, flujo másico), el fluido de trabajo y niveles de potencia, existen diferentes tipos de expansores que pueden utilizarse.

Generalmente, los expansores se clasifican en dos tipos:

- **Turbomaquinaria**, las cuales se refieren a las máquinas del tipo dinámico o de velocidad. Este tipo de maquinaria es utilizado principalmente en escalas medianas y grandes, pues son reconocidas por su alta eficiencia.
- **Máquinas volumétricas**, las cuales son conocidas también como máquinas de desplazamiento positivo. Estas máquinas actúan con el principio de aplicación de la fuerza sobre un componente mecánico para extraer potencia. Este tipo de maquinaria suele utilizarse para plantas de menor capacidad.

Según una clasificación hecha por Guoquan (2011) [40], los tipos de expansores más utilizados en los ORC son las turbinas, los expansores de tornillo, los expansores de Scroll, y los motores neumáticos o expansores de paletas.

2.2.2.1 Turbinas

En cuanto a la operación de una turbina, el fluido a alta presión es dirigido desde la salida del evaporador a la entrada de la turbina, donde la alta presión estática del vapor es convertida en alta velocidad mientras pasa a través de las boquillas. Esta velocidad del flujo provoca un momento en los álabes mientras va pasando. Los álabes están conectados a un eje, el cual está conectado a un generador que convierte la energía mecánica en eléctrica.

Las turbinas se pueden dividir en dos categorías: turbinas axiales y turbinas radiales. Su principal diferencia radica en la dirección en la que el fluido choca con los álabes. En el caso de las turbinas axiales, el flujo es paralelo al eje, mientras tanto, en las turbinas radiales, el flujo es radial al eje a la entrada y se convierte en axial a la salida de la turbina.

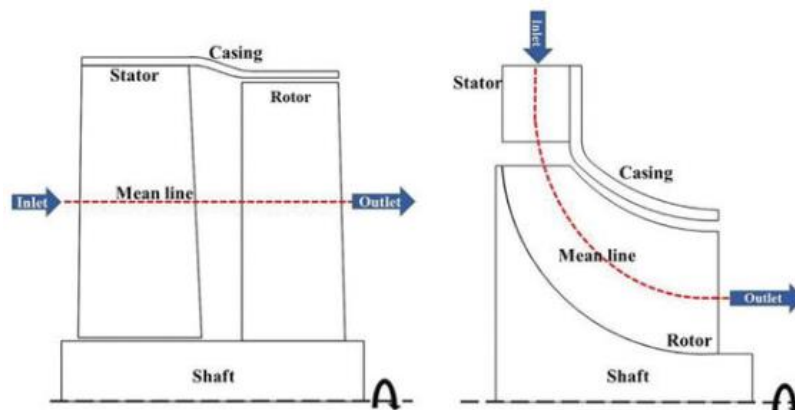


Figura 2.13 Esquema de una turbina de flujo axial (izquierda) y flujo radial (derecha).

La selección de la turbina depende principalmente del diseño del ciclo y lo que se espere obtener de él. Las turbinas axiales se prefieren utilizar en escalas más grandes de ORC por su alto flujo másico y una pequeña relación de presión. Al contrario de las turbinas radiales, donde el flujo másico es menor y la relación de presión mayor. Sin embargo, la selección óptima se basa de dos parámetros, la velocidad y el diámetro específicos, los cuales se basan en el flujo volumétrico y la caída entálpica.

Algunas de las ventajas que representa el uso de las turbinas de vapor como expansor se mencionan a continuación:

- Son adecuadas para impulsar generadores eléctricos, ya que se trata de un motor térmico rotativo.
- Suelen tener grandes eficiencias, las cuales rondan entre el 70 - 90%.**[41]**
- Tienen un alto rango de tamaños y potencias, se pueden diseñar turbinas para grandes centrales térmicas.
- Se pueden acoplar directamente a un generador de inducción.
- Bajos niveles de esfuerzo.
- Se pueden diseñar con distintos rangos de velocidades.

2.2.2.2 Expansores volumétricos

A diferencia de las turbinas donde el movimiento del fluido es continuo, en una máquina de desplazamiento positivo es más bien cíclico. Trabajan atrapando un determinado volumen del fluido, desplazando este volumen en la descarga de la máquina, lo que resulta en trabajo mecánico debido a la caída de presión.

Al contrario de lo que sucede con las turbinas, algunos expansores volumétricos pueden tener válvulas en los puertos de entrada y salida. Entonces el fluido comprimido se introduce en una cámara y las válvulas de entrada se cierran, entonces comienza el proceso de expansión, al terminar el proceso, se abre la válvula de salida para liberar el fluido de baja presión. **[42]**

Un punto importante por mencionar con los expansores volumétricos es que, al existir contacto entre algunas superficies de la máquina, es necesario contar con una buena lubricación para evitar el desgaste. Los expansores volumétricos suelen ser unos de los favoritos, debido a que reducen los costos del sistema debido a su diseño simple y bajos costos de fabricación, mayor par y mayor eficiencia volumétrica. Además de ser mecánicamente simples y estar disponibles comercialmente. Algunos de los principales tipos se mencionan a continuación.

2.2.2.3 Expansores de tornillo

Los expansores de tornillo están compuestos por dos rotores helicoidales diseñados con un perfil preciso para atrapar la cantidad requerida del fluido de trabajo. El movimiento sincronizado de los rotores entrelazados genera perfiles de volumen que se originan en un extremo del rotor y terminan en el otro extremo. Es ahí donde el fluido de trabajo se expande en una cámara mallada.

Este tipo de expansor requiere de una buena lubricación, debido a la fricción que hay entre sus componentes, sin embargo, con un fluido de trabajo con especificación de lubricación, se pudiera omitir. La tolerancia del rotor es inferior a 50 μm , por lo que las pérdidas por fugas son relativamente pequeñas. **[43]**

En general, las máquinas de tornillo son adecuadas para aplicaciones de potencia de 5 a 50 kW en ORC.

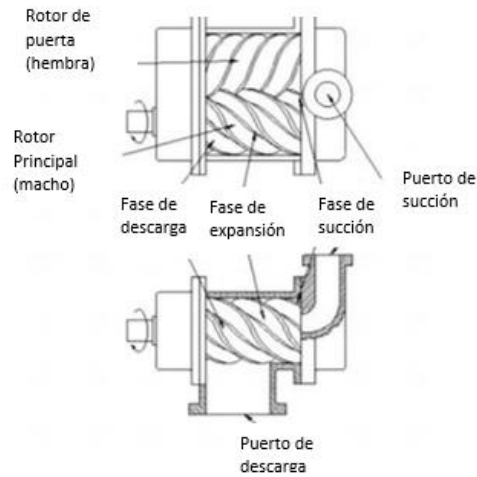


Figura 2.14 Esquema de un expansor de doble tornillo. [44]

2.2.2.4 Expansores Scroll

Los expansores Scroll o de desplazamiento constan de dos espirales: un desplazamiento en órbita y un desplazamiento fijo. Donde el desplazamiento en órbita se mueve junto con el desplazamiento fijo dentro de tolerancias ajustadas. El fluido de trabajo se mueve desde el centro hacia afuera dentro de la cámara entre el pergamino en órbita y en movimiento.

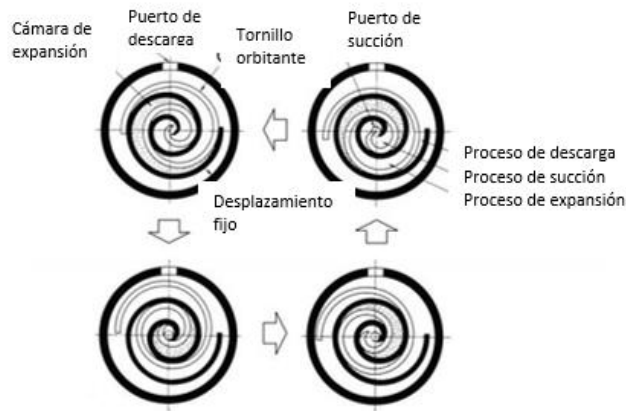


Figura 2.15 Funcionamiento de un expansor de desplazamiento. (Alshammari, Usman, & Pesyridis, 2018)

Este tipo de expansor es altamente utilizado, ya que pueden derivarse de un compresor Scroll, lo que reduce el costo de la máquina. Puede ser compatible o restringido, lo que se

traduce en si utiliza lubricante o no, respectivamente. De igual manera, no hay necesidad de válvulas de escape, lo que se traduce en una reducción del ruido.

Finalmente, los expansores Scroll funcionan principalmente en aplicaciones de salida de baja potencia (<10 kWe) debido a su velocidad limitada y su bajo número de piezas. [45]

2.2.2.5 Expansor de paletas rotativas

En este tipo de expansor, el fluido de trabajo ingresa al expansor en la ubicación que tiene una pequeña cavidad. Un rotor con paletas móviles consigue variar la geometría del volumen de control a lo largo de un ciclo gracias a la excentricidad que existe entre el rotor y estator.

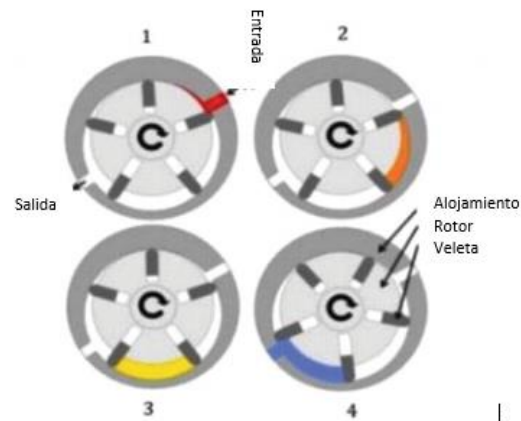


Figura 2.16 Funcionamiento de un expansor de paletas rotativas. [46]

La función de las paletas es la de confinar el gas en un espacio concreto, delimitando de esta manera el volumen de control. En este caso el volumen queda definido por el rotor, estator, y dos paletas consecutivas. Debido a la excentricidad del rotor y estator, la longitud de las paletas es distinto en cada ángulo, para lograr esto las paletas se mueven linealmente en dirección radial, con respecto del rotor, pudiendo retraerse o desplegarse. Por lo tanto, la rotación del rotor permite que las paletas se muevan hacia afuera mientras atrapan el fluido de trabajo, ya que el ángulo de rotación aumenta el volumen unido por paletas consecutivas y se produce la expansión del fluido de trabajo.

A continuación, se ilustra a manera de resumen los rangos de potencia aproximados para los que se utiliza cada uno de los diferentes tipos de expansores en distintas aplicaciones, así como las eficiencias aproximadas que entregan.

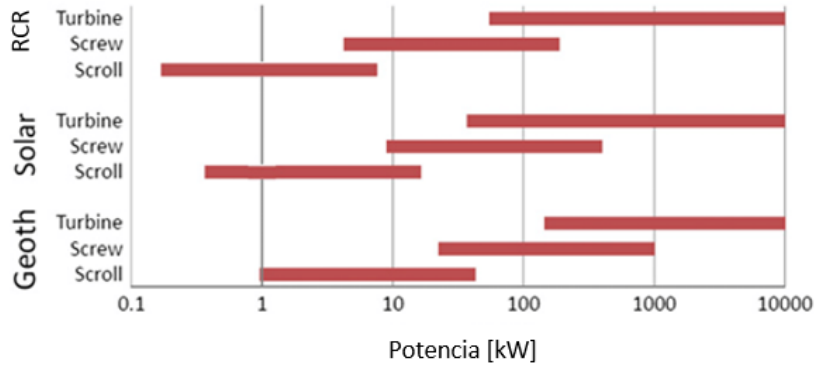


Figura 2.17 Rangos de potencia de diferentes expansores volumétricos y turbomáquinas, para aplicaciones de recuperación de calor residual, solar y geotérmica. [47]

Tipo de expansor	Eficiencia [%]
Turbina	85
Tornillo	60
Scroll	83
Paletas rotativas	90

Tabla 2.2 Eficiencias promedio de las diferentes tecnologías de expansión.

2.3 Fluidos de trabajo.

El Ciclo Rankine Orgánico ha sido una tecnología prometedora en los últimos años, ya que convierte calor de baja entalpía en potencia eléctrica. Para esto, utiliza sustancias orgánicas, usualmente refrigerantes, como fluido de trabajo.

Un refrigerante es una sustancia que actúa como medio de transporte de energía para llevar a cabo un proceso en un sistema térmico, con propiedades especiales de punto de evaporación, condensación, densidad, etc. Mediante cambios de presión y temperatura absorben calor y posteriormente lo disipan por medio de un cambio de fase.

La característica principal de dichos refrigerantes es que poseen un punto de ebullición mucho menor que el del agua, razón por la cual a menores temperaturas logran evaporarse para circular por el ORC y así accionar la turbina que, conectada a un generador eléctrico, produce potencia.

2.3.1 Características

Actualmente, en el mercado, existen diversos tipos de refrigerantes que pudieran cumplir con las especificaciones que se requieran para determinado ciclo. Comenzaré por mencionar el cómo se dividen, de acuerdo con sus características químicas.

El estándar 34 de la ASHRAE otorga una nomenclatura de forma abreviada para cada refrigerante, dividiéndolos en **[48]**:

- **Orgánicos.** Se refiere a aquellos cuya estructura atómica contiene enlaces de carbono-hidrógeno.
 - **Compuestos clorofluorocarbonados (CFC):** Son aquellos formados por átomos de carbono, flúor y cloro. Tienen una gran capacidad de destrucción de capa de ozono (ODP) debido a su inestabilidad y son los principales responsables del adelgazamiento de la capa de ozono. Se trata de compuestos con alta estabilidad química, bajos puntos de ebullición y baja viscosidad.
 - **Compuestos Hidroclorofluorocarbonados (HCFC):** Se trata de aquellos cuya estructura atómica contiene enlaces de hidrógeno, carbono, flúor y cloro. Son menos inestables que los anteriores, razón por la cual han representado una posibilidad para sustituir a los CFC, aunque siguen siendo altamente contaminantes.
 - **Compuestos Hidrofluorocarbonados (HFC):** Se trata de aquellos cuya estructura atómica incluye hidrógeno, carbono y flúor, esta vez sin contener cloro, lo que los hace menos dañinos para el medio ambiente.
 - **Compuestos Hidrocarbonados (HC):** Se trata de aquellos cuya estructura atómica solo contiene hidrógeno y carbono. No son sustancias agotadoras de la capa de ozono y su potencial de calentamiento global es inferior a 5.
 - **Ácido Hipofluoroso (HFO):** Se trata de aquellos cuya estructura atómica contiene hidrógeno, flúor y carbono, conectados por al menos una unión doble entre los átomos de carbono. Se trata de refrigerantes más amigables con el medio ambiente, pues cuentan con un potencial de agotamiento del ozono de cero y un muy bajo potencial de calentamiento global.
- **Inorgánicos.** Se refiere a aquellos cuya estructura atómica no contiene enlaces de carbono-hidrógeno.

Entonces, lo más lógico sería descartar los refrigerantes que contengan cloro, debido a que son muy contaminantes además de inestables. Los ORC suelen trabajar entonces con HFC, HC y HFO.

En el mercado existen muchas opciones que cumplen con esta característica y han demostrado ser efectivos en los ORC. La elección dependerá de sus propiedades fisicoquímicas y las condiciones a las que la planta sea operada. A continuación, se muestra una tabla con los refrigerantes más comunes y sus propiedades más características.

Fluido	Fórmula	Toxicidad	Flamabilidad	ODP *	GWP **	Tc °C	Pc, MPa
R134a	CH ₂ FCF	Baja	No inflamable	0	1430	101.0 6	4.059
R1233zd	CF ₃	Baja	No inflamable	0	7	165.6	3.573
R245fa	C ₃ H ₃ F ₅	Baja	No inflamable	0	1030	154.0 5	3.651
n-pentano	C ₅ H ₁₂	Baja	Muy alta	0	3	193.9	3.240
Isopentano	i-C ₅ H ₁₂	Baja	Muy alta	0	3	187.8	3.409
Isobutano	i-C ₄ H ₁₀	Baja	Muy alta	0	3	135.9 2	3.685
Agua	H ₂ O	-	No inflamable	-	-	374.1 4	22.08 9

Tabla 2.3 Propiedades medioambientales, seguridad, salud y termodinámicas de fluidos orgánicos. *Potencial de agotamiento de ozono **Potencial de calentamiento global

En la tabla 4 se observan algunas diferencias entre cada uno de ellos y se comparan con el agua donde claramente se puede apreciar que la temperatura y propiedades críticas están muy por encima de las de los fluidos orgánicos. En cuanto a los índices ODP y GWP, se hablará de ellos más adelante.

2.3.2 Selección del fluido de trabajo

La selección del fluido de trabajo en un ORC debe ser una de las mayores libertades que se dan para el diseño, pero no es una decisión simple pues dicha selección afecta directamente el ciclo termodinámico, el comportamiento del sistema, el costo de los componentes, entre otros aspectos. Algunos de los aspectos generales para la selección de un fluido son:

- El fluido debe estar disponible en el mercado a un precio razonable.
- Que el fluido no sea inflamable. Esto debido a que pueden traer complicaciones a futuro e inversiones innecesarias.
- El fluido no debe ser tóxico.
- El fluido debe ser compatible con los equipos del ciclo.
- El fluido debe ser bueno con el ambiente. [49]

2.3.2.1 Seguridad ambiental. Índices ODP y GWP.

Como se ha mencionado a lo largo del capítulo, uno de los puntos más relevantes para la elección del fluido de trabajo es la parte ambiental, pues en los últimos años se está buscando que la generación energética sea más amigable con el ambiente y que los residuos contaminantes sean los menos posibles.

Por esta razón es que los refrigerantes cuentan con unos índices que ayudan a determinar la cantidad de daño ambiental que genera cada uno, de acuerdo con su composición y su comportamiento en el campo de trabajo. A continuación, se nombran dichos índices y se explica su relevancia en las características de un fluido.

Índice ODP: Llamado *Ozone Depletion Potential*, o Potencial de Destrucción de la Capa de Ozono, se define como la relación entre la pérdida global de ozono debida a determinadas sustancias y la pérdida global de ozono debida a la liberación de la misma masa de CFC-11. El ODP varía de 0 a 1 y mientras más próximo sea el valor a cero, menor el impacto en la capa de ozono.

Índice GWP: Llamado *Global Warming Potential* o Potencial de Calentamiento Global, compara la cantidad de calor atrapado por una cierta masa del gas en cuestión con la cantidad de calor atrapado por una masa igual de dióxido de carbono. Se considera que el CO₂ tiene un GWP de 1, como medida estándar, y mientras mayor sea este índice, mayor será el impacto sobre el calentamiento global.

Entonces, en cualquier proyecto energético, se busca que estos índices sean lo menor posible, para que así el impacto ambiental de utilizarlos sea mínimo y se pueda seguir considerando como un proyecto sustentable.

Anteriormente, en un proyecto del grupo IIDEA, se realizó una planta con ORC pero de una capacidad del 10 kW. En dicho proyecto se optó por utilizar el refrigerante R245fa como fluido de trabajo, principalmente por sus características y propiedades fisicoquímicas que van bien con las características de operación de la planta, sin embargo, ahora se está buscando otra opción que cumpla de igual manera con los requerimientos, pero que tenga un menor impacto ambiental. Fue así como se determinó que el R1233zd podría ser una buena opción, en cuanto a su similitud con el R245fa, debido a que este fue el refrigerante que se utilizó en el proyecto de 10 kW que propuso anteriormente grupo IIDEA.

Como se puede observar en la tabla 4, presentada en el punto 2.1.1, ambos refrigerantes cuentan con un ODP igual a 0, lo que indica que sus emisiones no son destructivas de la capa de ozono, sin embargo, la diferencia radica en que el R245fa cuenta con un índice GWP de 1030, mientras que el R1233zd sólo es de 7, lo que lo hace una mejor opción si lo que se busca es que el impacto ambiental sea menor.

2.3.2.2 Temperatura y presión crítica.

En el análisis es importante considerar las condiciones de temperatura a las que va a operar el fluido, y está condicionado principalmente por la fuente de calor. Se espera que el ORC del grupo IIDEA opere con una temperatura del recurso geotérmico a 170° y una presión aproximada de 8.5 bar, esto debido a que como se ha mencionado con anterioridad, este proyecto representa la continuación de un proyecto de 10kW de potencia que ya se probó y se operó en el campo geotermoeléctrico Domo de San Pedro en Nayarit, cuyas temperaturas y presiones de salmuera fueron las mismas que se están proponiendo para el diseño de este nuevo ciclo binario.

Entonces, lo primero a considerar serán las propiedades fisicoquímicas de cada uno de los refrigerantes a considerar, las cuales se encuentran descritas en la tabla siguiente.

Propiedad	R245fa	R1233zd
Temperatura crítica	154°C	165.6 °C
Presión crítica	36.51 bar	35.73 bar
Temperatura de ebullición	15.3 °C	19 °C

Tabla 2.4 Propiedades físico-químicas del R245fa comparadas con el R1233zd

En la Figura 2.18 se puede observar el comportamiento de la entropía contra la temperatura en cada uno de los refrigerantes analizados. Mediante el gráfico, es evidente que ambos fluidos comparten características similares, sin embargo, difieren en el punto de saturación, pues el R1233zd cuenta con una temperatura de saturación mayor que el R245fa, lo cual podría indicar que, si se hiciera un análisis de eficiencia térmico bajo las mismas condiciones, podría significar una mayor eficiencia.

En cuanto al diagrama de presión, se puede deducir que nuevamente, siguen un comportamiento similar, y cuentan con un punto de presión crítica casi igual, pero ligeramente menor en el caso del R1233zd.

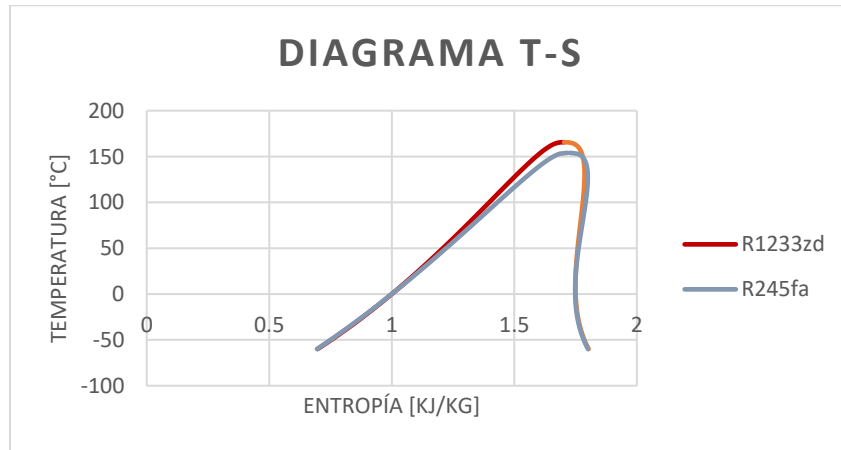


Figura 2.18 Diagrama T-S de R245fa contra R1233zd

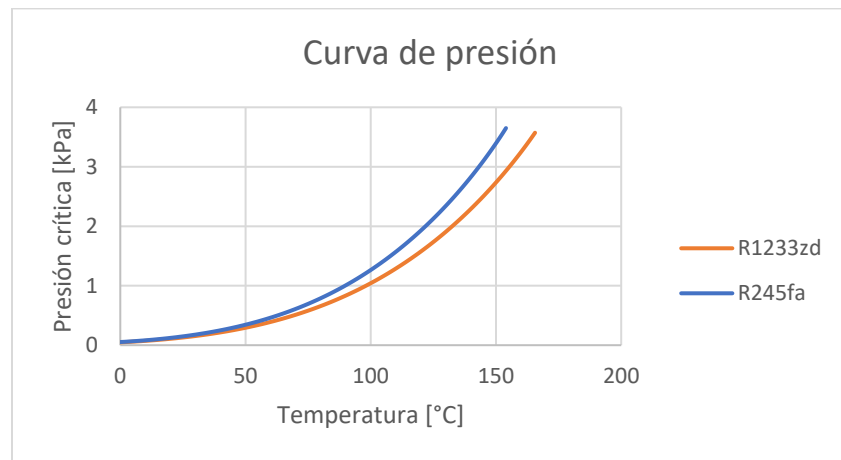


Figura 2.19 Curva de presión del R245fa contra R1233zd

A continuación, se presenta un diagrama de flujo con la configuración del ORC que se va a considerar para el proyecto.

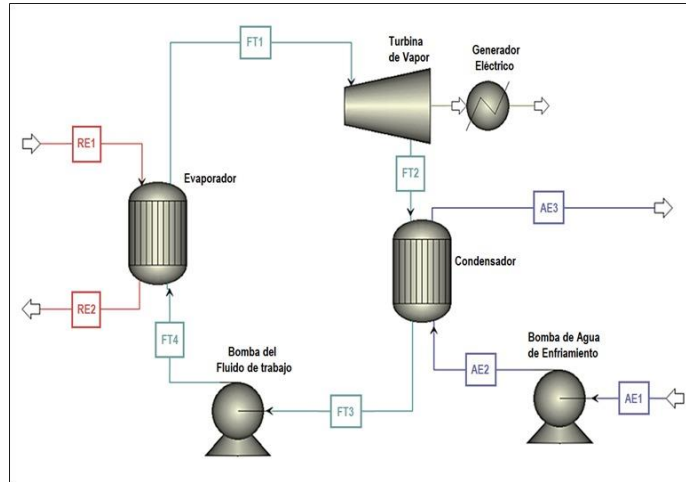


Figura 2.20 Diagrama de flujo del ORC del IDEA 100

En la tabla siguiente, se enlistan más específicamente los datos técnicos considerados para el análisis.

Fuente geotérmica	
Temperatura [°C]	160
Presión [bar]	6
Fluido	Salmuera
CICLO IDEA-100	
Fluido	R1233zd
Presión de entrada a la turbina [bar]	20
Temperatura de entrada [°C]	Temperatura de vapor saturado, 143°C
Relación de presión	5.5
Caída de presión en el condensador [bar]	0.7
Torre de enfriamiento	
Fluido	Agua
Temperatura a la entrada [°C]	22
Temperatura a la salida [°C]	38
Presión [bar]	Atmosférica, 1
Diferencia de presión en el condensador [bar]	0.7
Datos de los equipos	
Eficiencia de la turbina [%]	70
Eficiencia isentrópica de las bombas [%]	70
Acercamiento de temperatura en el intercambiador [°C]	10
Sobrecalentamiento del vapor [°C]	10
Eficiencia del generador [%]	90

Tabla 2.5 Datos considerados para el análisis termodinámico

Ahora bien, haciendo una comparación entre la eficiencia de ambos fluidos, con las mismas condiciones de operación, se obtienen los resultados descritos a continuación.

Comparación del rendimiento del sistema	Unidades	R1233zd	R245fa
Calor en el evaporador	kWt	1161.64	1179.82
Calor en el condensador	kWt	1025.692	1047.95
Potencia en la bomba FT	kWt	10.78	10.08
Potencia en la bomba AE	kWt	1.92	1.92
Potencia generada	kW	112.476	109.77
Potencia eléctrica bruta	kW	125.17	121.77
Potencia de bombeo	kW	12.69	12
Potencia eléctrica neta	kW	101.23	98.79
Eficiencia del ciclo	%	8.71	8.37

Tabla 2.6 Resultados de análisis usando R245fa y R1233zd

Con base en los resultados anteriores, se puede confirmar que como se había supuesto en la hipótesis, la eficiencia térmica del R1233zd es ligeramente mayor en comparación con la del R245fa. Esto nos garantizaría una obtención de potencia mayor a menores exigencias en el sistema, lo que representaría un menor costo económico para operar la planta y mejores resultados.

2.3.2.3 Estabilidad térmica

Otro punto de análisis importante es la estabilidad del fluido de trabajo, pues se busca que en ninguna circunstancia se vea modificada su composición, ya que esto podría representar cambios en el ciclo e irregularidades que significarían un desempeño diferente al deseado.

En cuanto a ambos refrigerantes, se ha demostrado en pruebas de laboratorio que poseen un alto grado de estabilidad térmica e hidrolítica. Ensayos de estabilidad térmica de tubos sellados realizados a condiciones de 260°C durante cuatro semanas, demostraron que bajo estas condiciones la pureza de los refrigerantes se mantuvo intacta. De igual manera, en ensayos de tubos sellados, exponiendo los refrigerantes a agua y metales (aluminio y acero inoxidable) a condiciones de 75°C a 200°C, tampoco demostraron señales de descomposición.⁷

Cabe mencionar que el nivel de estabilidad de cualquier refrigerante depende de las condiciones de almacenamiento y que sean adecuadas. Se recomienda no exponer los cilindros a temperaturas mayores de 50°C, fuera de la luz directa del Sol y en un área fresca y bien ventilada.

⁷ La estabilidad puede verse afectada por la presencia de aire, metales o lubricantes, las condiciones de operación deben ser tomadas en cuenta para el análisis. Información obtenida de manuales de Honeywell.

2.3.2.4 Mezclas Zeotrópicas para fluidos de trabajo

Como se ha mencionado anteriormente, unas de las fortalezas de utilizar refrigerantes en los ORC es que poseen temperaturas críticas considerablemente menores (entre 100 y 300°C) y entalpías de vaporización / condensación menores en comparación al agua.

Una de las últimas modificaciones que se han hecho a los ciclos es la utilización de mezclas zeotrópicas como fluido de trabajo. El motivo central es el aumento de eficiencia lograda con las mezclas. El objetivo de estas mezclas es combinar refrigerantes, para de esta manera lograr tener gradientes de temperatura creados por las diferentes temperaturas de ebullición de los fluidos que componen la mezcla, pudiendo mejorar el rendimiento del fluido de trabajo en los intercambiadores de calor, pues las mezclas reducen las pérdidas de exergía tanto en el condensador como en el evaporador [50]. Además de que para mejorar la eficiencia de los ORC se puede usar el control dinámico de la composición de la mezcla, cambiando la composición de la mezcla para controlar el gradiente de temperatura durante la condensación, para casos donde el sumidero de calor suele variar su temperatura.

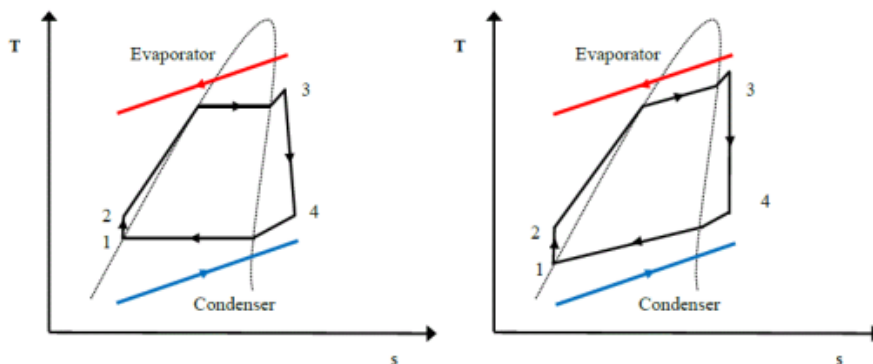


Figura 2.21 Diagrama T-S de un ORC con un fluido puro (izquierda) y un ORC con fluidos de trabajo mezclados (derecha). (Torres Rodríguez, 2019) [51]

Como se puede observar en ambos diagramas, el éxito de las mezclas zeotrópicas radica en que la transición de fase no es isotérmica, lo cual hace que el fluido siga mejor la fuente de calor, aumentando la eficiencia y reduciendo las pérdidas exergéticas, consiguiendo una temperatura mayor a la entrada de la turbina. Lo mismo sucede en el lado de la condensación, resultando en un rechazo de calor en una temperatura media menor.

Para seleccionar los fluidos de trabajo adecuados para mezclar, se debe garantizar que ambos fluidos por separado sean estables y se comporten bien como un medio puro. Para asegurar la mezcla, se deben seleccionar hidrocarburos o siloxanos. Algunas mezclas que han demostrado funcionar se enlistan a continuación.

1. R141b con RC318 [52]
2. R245fa con R152a [53]
3. Isobutano con Isopentano [54]
4. R227ea con R245fa⁸

⁸ IDEM

Según las referencias anteriores, en todos los casos las mezclas han tenido un mejor comportamiento en los ORC, aumentando las eficiencias de los ciclos desde un 15% hasta un 29%. Sin embargo, uno de los mayores retos al utilizar una mezcla zeotrópica es que el conocimiento en cuanto a la transferencia de calor y la caída de presión es limitado, al ser un método relativamente nuevo en el área

2.4 Introducción a la selección de tuberías, bridas y válvulas.

Para el desarrollo del proyecto del ciclo binario IDEA 100 se necesita el uso de elementos de tubería, válvulas, accesorios y bridas para la instalación y conexión del Ciclo Rankine Orgánico. Estos accesorios y tuberías requieren ser dimensionados y seleccionados según los criterios de diseño cumpliendo con el código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), para de esta manera, garantizar el correcto funcionamiento de todo el sistema. A continuación, se especifican cada uno de los estándares que se tomarán en cuenta para el análisis, y el área que abarcan.

- ASME B16.34: *Válvulas – bridadas, roscadas y con extremo de soldadura.*
- ASME B16.5: *Bridas de tuberías y accesorios bridados.*
- ASME B16.9: *Accesorios de tubería de soldadura a tope.*
- ASME B31.1: *Tuberías de Energía.*
- ASME B31.3: *Tuberías de proceso.*
- ASME B36.10: *Tubo de acero forjado soldado y sin costura.*

Cada uno de los estándares anteriores van a ayudar para seleccionar las tuberías y los acoplamientos necesarios. Se va a determinar mediante cálculos el diámetro y espesor requeridos para la tubería en el módulo de la unidad del ciclo binario IDEA 100, así como en los sistemas geotérmico y de agua de enfriamiento. De igual manera, se van a determinar las especificaciones comerciales de tubería y accesorios correspondientes con los cálculos de diámetro y espesor de tuberías.

2.4.1 Metodología de selección de tuberías

El dimensionamiento de tuberías sometidas a presión interna consta de dos puntos centrales: uno es el cálculo del diámetro requerido para cumplir con el gasto másico solicitado, y el segundo es el cálculo del espesor necesario para poder soportar la presión interna, para posteriormente seleccionar un diámetro y cédula comercial que cumpla con dichos requerimientos. Cuando se conoce el gasto másico y la fase en la que se encuentra el fluido en cada segmento de la tubería, se calcula el diámetro requerido con la expresión de la conservación de la masa.

$$D_R = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\pi\rho v}} \quad (1)$$

Donde: D_R = diámetro requerido de tubería, [m]

\dot{m} = gasto másico, [kg/s]

ρ = densidad del fluido en ese segmento, [kg/m³]

v = velocidad propuesta con base en la condición del flujo; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [m/s]

Condición de Flujo	Velocidad ⁹
Líquido	1 – 2 m/s
Vapor	30 – 40 m/s

Tabla 2.7 Velocidades recomendadas de flujo en tuberías.

Una vez que se calcula un diámetro apropiado, el código ASME B31.1 POWER PIPING en su capítulo II detalla la ecuación para calcular un espesor mínimo requerido t_m de tubería, dadas las condiciones de presión interna y el tipo de material que se determine para la tubería, la cual se describe de la siguiente manera:

$$t_m = \frac{P_D D_o}{2(SE + P_D y)} + A \quad (2)$$

Donde: t_m = mínimo espesor de pared requerido, [mm]

P_D = presión de diseño manométrica, [Mpa]. (2 veces la presión de operación. Esto con el fin de tener un sobrante en el diseño para cualquier fluctuación en la presión que pudiera presentarse).

D_o = diámetro exterior de tubería, [mm]. Tabulado en anexo 2.1 de este documento

SE = máximo esfuerzo permisible [Mpa] del material debido a presión interna, material y temperatura. Tabulado en anexo 2.2 de este documento

A = espesor adicional [mm]. 3.5 mm en el Sistema Geotérmico (SG) y Sistema de Condensación (SC); 2 mm en Sistema Rankine Orgánico (SRO).

y = coeficiente basado en la temperatura de diseño y composición del material según la tabla 104.1.2(A) del Código. Tabulado en anexo 2.3 de este documento.

La presión máxima permisible se obtiene despejando P_D de la ecuación (2) y considerando que el espesor real de tubería es uno nominal especificado en el estándar, según se haya seleccionado el espesor adecuado:

$$P_{max} = \frac{2SE(t_{nom} - A)}{D_o - 2y(t_{nom} - A)} \quad (3)$$

⁹ El código ASME B31.1-2010 en la tabla IV-5.2 recomienda que no se exceda del límite de 3 [m/s] para la velocidad de un fluido líquido, y de 45 [m/s] para un fluido en vapor, para evitar posibles problemas de corrosión o erosión en las tuberías.

Dichas ecuaciones se aplicarán a los 4 puntos termodinámicos principales que componen el SRO, así como a los 2 estados del sistema geotérmico y a los 3 en el sistema de enfriamiento.

2.4.2 Metodología de selección de bridas

El método de determinación de clase de bridas se detalla en el apéndice A del estándar **ASME B16.5 Pipe Flanges and Flanged Fittings**. La metodología evalúa esfuerzos del material a la temperatura T de trabajo para obtener la máxima presión de trabajo p_t , esta presión debe cumplir con la condición de ser menor que el máximo permisible de presión p_c a la temperatura T:

$$p_t = \frac{C_1 S_1}{8750} P_r \leq p_c \quad (4)$$

Donde: $C_1 = 10$ si S_1 se expresa en MPa

p_c = presión máxima (en bar) a temperatura T. Valor tabulado en anexo 2.6 de este documento

P_r = Índice de clasificación de clase de presión

Para Clase 150, $P_r=115$; para Clase 300 y superiores, es igual al número de designación de clase. Por ejemplo, $P_r=600$ si la clase de brida es 600.

S_1 = esfuerzo seleccionado (en MPa) para el material especificado a temperatura T.

Los materiales que se seleccionaron para la construcción de los sistemas de tuberías pertenecen al Grupo No. 1 de la **sección II, parte D, del Código ASME Boiler and Pressure Vessel**. Para los cuales, el valor de esfuerzo seleccionado S_1 se evalúa como sigue:

A temperaturas abajo del rango de fluencia, debe cumplirse que S_1 sea menor que:

- 60% del valor de esfuerzo mínimo de cedencia S_y a 38°C. Tabulado en anexo 2.4
- 60% del valor de esfuerzo mínimo de cedencia S_y a temperatura T. IDEM
- 1.25 veces el 25% del valor de esfuerzo último a la tracción S_u a temperatura T. Tabulado en el anexo 2.5

2.4.3 Metodología de selección de válvulas.

La selección de clase de válvulas se realiza con base en los resultados de la selección anterior de bridas y, mediante la metodología de la norma **ASME 16.34 Valves - Flanged, Threaded, and Welding End**, se comprobará si esta clase es la adecuada para las válvulas, la clase tiene que ver directamente con las presiones que tenga que soportar el sistema. El método que debe utilizarse para determinarla es el descrito a continuación, donde la máxima presión de trabajo p_{st} de la válvula no debe superar el valor del tope de presión p_{ca} a la temperatura T de trabajo:

$$p_{st} = \frac{C_1 S_1}{8750} P_r \leq p_{ca} \quad (5)$$

Donde: p_{st} = máxima presión de trabajo.

p_{ca} = tope de presión a temperatura T. tabulado en el anexo 2.7

P_r = Índice de clasificación de clase de presión.

Para Clase 150, es igual a 115.

Para Clase 300 a 4500, es igual al número de designación de clase.

S_1 = esfuerzo seleccionado para el material especificado a temperatura T.

El material seleccionado para válvulas y bridas es acero al carbono del grupo 1.1 de la sección II, parte D, del Código ASME *Boiler and Pressure Vessel*. Para los cuales, el valor de esfuerzo seleccionado S_1 se evalúa como sigue:

A temperaturas abajo del rango de fluencia, debe cumplirse que S_1 sea menor que:

- 60% del valor de esfuerzo mínimo de cedencia S_y a 38°C. Tabulado en el anexo 2.4
- 60% del valor de esfuerzo mínimo de cedencia S_y a temperatura T. IDEM
- 1.25 veces el 25% del valor de esfuerzo último a la tracción S_u a temperatura T. Tabulado en el anexo 2.5

Como se puede observar, la metodología para la determinación de clase de válvulas es exactamente la misma que para calcular clase de bridas. Incluso se verifica que los valores de p_{st} y p_{ca} son equivalentes a los valores de p_t y p_c de la metodología para bridas, pues los aceros seleccionados cumplen con las mismas características (Revisar anexo 2.4 y 2.5 contenido en esta tesis). De tal modo, se verifican las clases de válvulas de los segmentos de tubería de la misma manera que en el caso de las bridas.

Para todos los cálculos anteriores es necesario primero determinar el balance de masa y energía del ORC, pues se necesitan datos como temperaturas, presiones y densidades, por lo tanto, el procedimiento y los resultados se especificarán más a detalle en el capítulo siguiente.

2.5 Fuentes consultadas

- [28] DiPippo, R. (1991). *Geothermal energy electricity generation and environmental impact*. Energy Policy.
- [29] KCORC. (06 de 2013). *kcorc.org*. Obtenido de <https://www.kcorc.org/en/science-technology/history/>
- [30] Ikerá. (10 de 06 de 2021). *Ikerá*. Obtenido de <https://ikerá.es/maximizando-la-eficiencia-del-calor-industrial-el-ciclo-rankine-organico/>
- [31] Imbaquingo, S. (2016). *Simulación de mejoras del ciclo Kalina mediante la utilización de mezclas de fluidos orgánicos*. Quito.
- [32] Castro, M. (2018). *Planta de Potencia ORC Con Fuente energía renovable*. España.
- [33] Cengel, Y. (2012). *Termodinámica*. New York: McGraw-Hill.
- [34] Matus, M. (2018). *Análisis de complementariedad económica y técnica de la geotermia y la energía solar*. Santiago de Chile.
- [35] Calderón, J. R., & Palencia, E. C. (2016). *Diseño conceptual de un sistema híbrido integrado de simple flash-binario para una planta geotérmica*. El Salvador.
- [36] Sampedro, J. L. (2017). *Aplicación de ciclos Rankine Orgánicos de baja temperatura a sistemas de microgeneración*. Gijón.
- [37] Zhar, R., Allouhi, A., Jamil, A., & Lahrech, K. (2021). A comparative study and sensitivity analysis of different ORC configurations for waste heat recovery. *Elsevier*, 14.
- [38] Li, Z., Lu, Y., Huang, Y., Qian, G., Chen, F., Yu, X., & Roskilly, A. (2017). Comparison study of Trilateral Rankine Cycle, Organic Flash Cycle and Basic Organic Rankine Cycle for low grade heat recovery. *ScienceDirect*, 7.
- [39] Quintanilla, J. (2019). *Estudio de centrales basadas en Ciclos Rankine Orgánicos*. Madr
- [40] Guoquan, Q. (2011). *Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle*.
- [41] Cengel, Y. (2012). *Termodinámica*. New York: McGraw-Hill.
- [42] Alshammari, F., Usman, M., & Pesyridis, A. (11 de 2018). *Research Gate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/328791945_Expanders_for_Organic_Rankine_Cycle_Technology
- [43] Imran, M., Usman, M., & Lee, D. (2016). *Volumetric expanders for low grade & waste heat recovery applications*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier.
- [44] Alshammari, F., Usman, M., & Pesyridis, A. (11 de 2018). *Research Gate*. Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/328791945_Expanders_for_Organic_Rankine_Cycle_Technology

- [45] Imran, M., Usman, M., & Lee, D. (2016). *Volumetric expanders for low grade & waste heat recovery applications*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier.
- [46] Alshammari, F., Usman, M., & Pesyridis, A. (11 de 2018). *Research Gate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/328791945_Expanders_for_Organic_Rankine_Cycle_Technology
- [47] Txintxurreta. (10 de 09 de 2021). *Ensayos experimentales de expansor scroll en ciclo ORC con refrigerantes de bajo GWP para aplicaciones marinas*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/54043/TFM_MikelTxintxurretaSalaberria.pdf?sequence=1
- [48] Mendoza. (2016). *Selección de fluido de trabajo para el Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI)*.
- [49] Macchi, E. (2017). *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems Technologies and Applications*. Elsevier.
- [50] Chys, M., Van den Broek, M., Vanslambrouck, B., & De Paepe, M. (2012). Potential of zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles. *Elsevier*.
- [51] Torres Rodríguez, R. J. (02 de 2019). *evaluación del desempeño de mezclas zeotrópicas como fluido de trabajo en ciclos Rankine de baja y media temperatura*. Santiago, Chile.
- [52] Li, W., Feng, X., Yu, L., & Xu, J. (2011). Effects of evaporating temperature and internal heat exchanger on organic rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*.
- [53] Wang, X., & Zhao, L. (2009). Analysis of zeotropic mixtures used in low temperature solar rankine cycles for power generation. *Solar energy*.
- [54] Heberle, F., PreiBinger, M., & Brüggerman, D. (2012). Zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles for low-enthalpy geothermal resources. *Renewable Energy*.

Capítulo III.

Ingeniería Básica y de Detalle de un ORC con capacidad energética de 100 [kW].

En este capítulo se empieza a dar un enfoque más real al proyecto. Se comienza por el análisis de la fuente energética y el balance de masa y energía con el cual se trabajarán todas las etapas del proyecto.

El balance de masa y energía servirá para identificar todas las características que deberá cumplir nuestro sistema, para de esta manera, poder hacer el diseño de nuestro ciclo, y la selección del equipo correspondiente con el que va a operar el ORC, con las características adecuadas para cumplir con los requerimientos necesarios. De igual manera, se va a describir con más detalle la selección de las tuberías del ORC, con su análisis correspondiente para poder justificarlo.

Se ilustrará el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) y de flujo de proceso, para ilustrar mejor lo que sería la instalación del ciclo, con sus accesorios, especificaciones e instrumentos necesarios.

Eventualmente, con la recopilación de los datos anteriores, se harán listas con especificaciones y componentes necesarios, en cuanto al área mecánica.

Finalmente, se mencionará a grandes rasgos lo necesario para el precomisionamiento y comisionamiento de una planta de ciclo binario con la capacidad de 100 kW, para así conocer, entender y respetar el proceso que debe llevarse a cabo para la futura puesta en marcha.

3.1 Análisis de la fuente energética.

En el capítulo 2 se habló sobre los distintos tipos de yacimientos geotérmicos que pudieran presentarse en un campo. En el caso del domo de San Pedro se cuenta con un yacimiento de líquido dominante de donde se obtendrá salmuera la cual se podrá extraer desde un silenciador. En éste nos vamos a conectar tanto para extraer el recurso geotérmico, como para desecharlo.

A continuación, se describe mejor el proceso de captación de salmuera:

1. Se propone una conexión en la línea 250-B-51-009-AT existente en la plataforma 4 del Domo de San Pedro, ilustrada en la figura 3.1.
2. La conexión se propone con tubería de 76.2 mm (3 pulgadas) de D.N.
3. Se requieren trabajos de cimentación, soportería, soldadura e instalación de un aislamiento térmico. Trabajos cuyos costos serán considerados como una aproximación para el análisis económico de la planta, tomando en consideración algunas pautas que se mencionan a detalle en el capítulo 4.

Ahora bien, para la descarga del recurso geotérmico se hará un proceso similar al mencionado anteriormente. El cual se describe a continuación:

1. Se propone una conexión al silenciador TK-01-001 en una de las tomas disponibles, ilustrado en la figura 3.1.
2. La conexión sería mediante una brida ciega de 76.2 mm (3 pulgadas) de D.N. con una tubería de 76.2 mm (3 pulgadas) de D.N. soldada concéntricamente.
3. Se requieren trabajos de soportería, soldadura e instalación de aislamiento térmico. Los costos de dichos trabajos serán considerados como una aproximación en el análisis económico final de la planta.

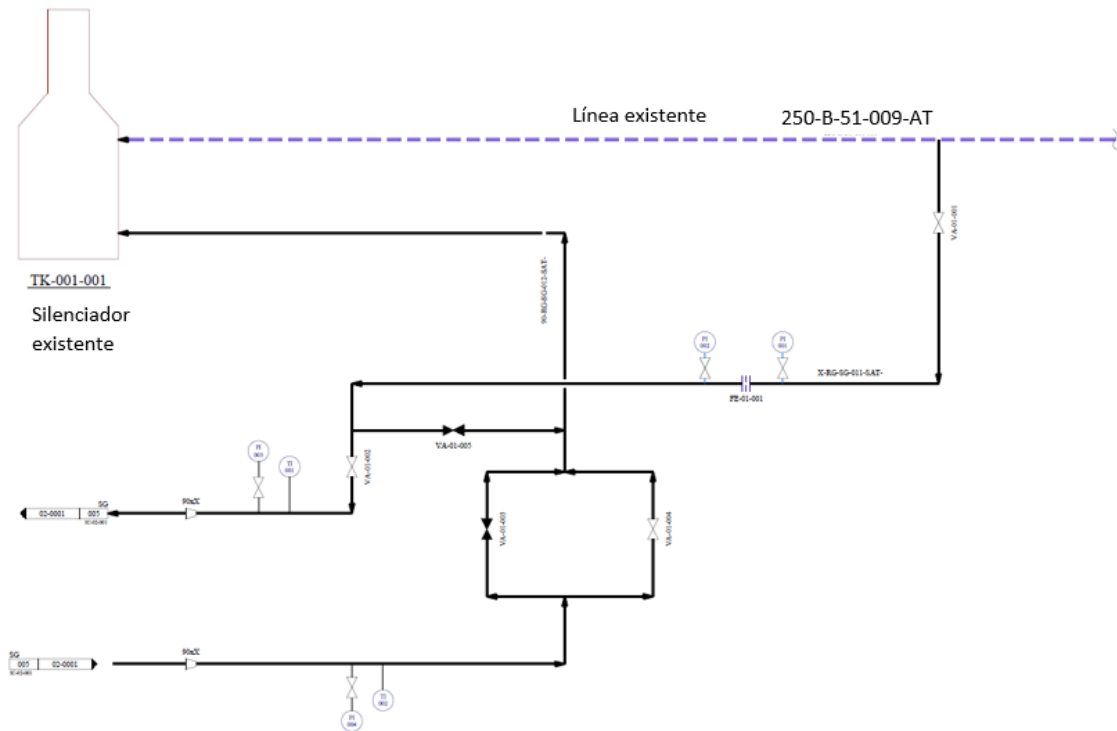


Figura 3.1 DTI de la conexión del sistema ORC a la toma del recurso geotérmico.



Figura 3.2 Vista Satelital de la plataforma 4 en el Domo de San Pedro.

3.2 Balance de masa y energía

En grupo IIDEA se tomó la decisión de hacer un ciclo simple para el diseño del ORC de 100 kW, esto debido a que el objetivo de este proyecto es contar con una unidad compacta y económicamente atractiva para el aprovechamiento de fuentes energéticas de baja temperatura, cuyo diseño no demande demasiados requerimientos para su adquisición e implementación, al tratarse de una planta de baja capacidad energética. Al diseñarse una configuración simple se logra que las demandas del diseño sean menores, a costa de sacrificar un poco la eficiencia. De igual manera, la razón principal de dicha selección es que se cuenta con un presupuesto limitado, el cual nos permite diseñar un ciclo binario simple que cumpla perfectamente con los requerimientos demostrativos y que pueda generar la potencia eléctrica solicitada.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que ilustra los componentes principales del ORC del grupo IIDEA, así como su funcionamiento. El mismo diagrama se ilustra anteriormente, en el capítulo 2 sección 2.1.2.2.

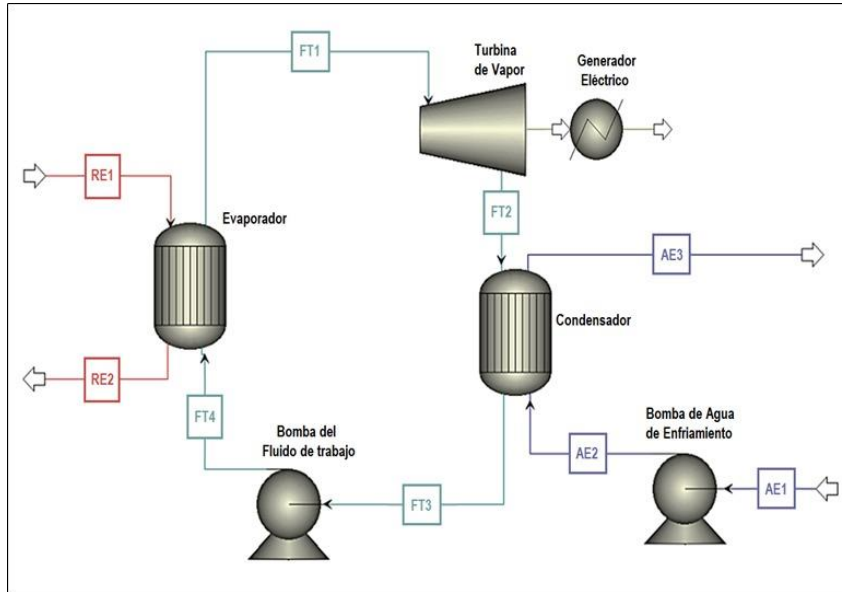


Figura 3.3 Diagrama de flujo del IDEA 100.

En el diagrama anterior, en el SG, la simbología RE1 y RE2 hace referencia al Recurso energético, o sea el recurso geotérmico. En el punto central se observan 4 etapas principales del ORC con la simbología FT, las cuales hacen referencia al fluido de trabajo, en este caso el R1233zd. Finalmente, en el SC se observa la simbología AE en 3 puntos principales, la cual hace alusión al agua de enfriamiento del sistema completo.

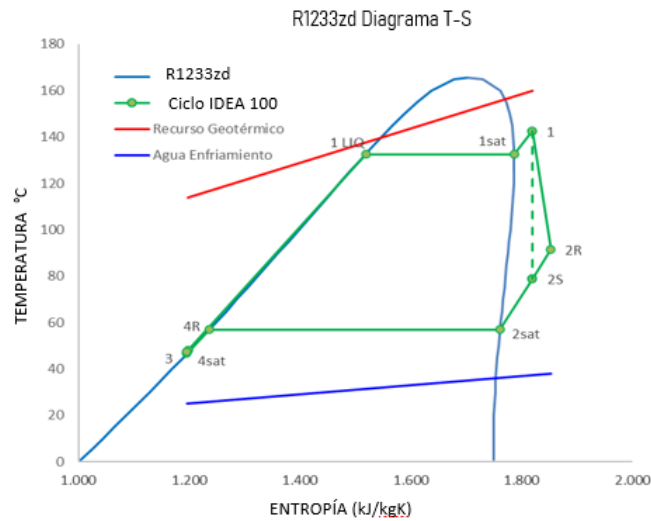


Figura 3.4 Diagrama T-s del R1233zd

Los procesos termodinámicos ideales que se llevan a cabo para conformar el ORC simple son formalmente los siguientes:

- 1-2R: Expansión isentrópica del fluido en la turbina hasta presión del condensador. Generación de trabajo mecánico.

- 1-2s: Expansión real en la turbina.
- 2R-3: Extracción de energía en forma de calor. Proceso isobárico. Se realiza en el condensador. El líquido de trabajo alcanza el estado de líquido saturado.
- 3-4sat: Compresión isentrópica del fluido de trabajo mediante la bomba. Se aumenta la presión a la del evaporador.
- 3-4R: Compresión real.
- 4R-1: Adición de energía en forma de calor. Proceso isobárico.

De esta manera, se tomaron en cuenta las condiciones iniciales especificadas a continuación, esto con el objetivo de hacer posteriormente el balance de masa y energía del sistema, para determinar todos los puntos termodinámicos de interés para el diseño del ORC.

Fuente geotérmica	
Temperatura [°C]	170
Presión [bar]	8.5
Fluido	Salmuera/H ₂ O
CICLO IDEA-100	
Potencia [kW]	100
Presión de entrada a la turbina [bar]	20
Temperatura de entrada [°C]	Temperatura de vapor saturado del R1233zd a dicha presión
Relación de presión	2.3
Caída de presión en el condensador [bar]	0.5
Fluido de trabajo	R1233zd
Torre de enfriamiento	
Fluido	Agua
Temperatura a la entrada [°C]	25
Temperatura a la salida [°C]	38
Presión [bar]	Atmosférica, 1
Diferencia de presión en el condensador [bar]	1
Datos de los equipos	
Eficiencia de la turbina [%]	70
Eficiencia de las bombas [%]	70
Acercamiento de temperatura en el intercambiador [°C]	10
Sobrecalentamiento del vapor [°C]	10
Eficiencia del generador [%]	90

Tabla 3.1 Datos para el análisis energético del ORC IDEA 100.

3.2.1 Cálculo de cargas térmicas

De acuerdo con el principio termodinámico de los ORC, el Ciclo Binario IDEA 100 requiere de una fuente térmica que suministre energía y un sumidero de calor al que pueda ser rechazada la energía térmica que no pueda ser transformada en energía eléctrica. Por esta razón se va a considerar la implementación de una torre de enfriamiento para la parte del SC, así como la conexión a un silenciador y tubería existente que va a un pozo geotérmico.

Tomando entonces como base los datos de entrada del recurso geotérmico, a las condiciones de $T= 170^{\circ}\text{C}$, $P= 8.5 \text{ Bar}$ y $\dot{m}= 5.7 \text{ kg/s}$, se realizan los balances de masa y energía y se toman en cuenta las siguientes consideraciones para cada etapa del ciclo.

Consideración de procesos isentrópicos

Expansión: $FT1 = FT2$

Bombeo de fluido de trabajo: $FT3 = FT4$

Bombeo de agua de trabajo: $AE1 = AE2$

Balance en la turbina

$$\dot{m}_{FT2} = \dot{m}_{FT1}$$

$$W_t = \dot{m}_{FT1}h_{FT1} - \dot{m}_{FT2}h_{FT2}$$

$$W_t = \frac{\text{Pot. eléctrica}}{\eta_{\text{generador}}}$$

Balance en el evaporador

$$\dot{m}_{RE2} = \dot{m}_{RE1}$$

$$\dot{m}_{FT1} = \dot{m}_{FT4}$$

Vapor sobrecalentado

$$\dot{m}_{FT1}(h_{FT1} - h_{FT4}) = \dot{m}_{RE1}(h_{RE1} - h_{RE2})$$

Balance en el condensador

$$\dot{m}_{AE2} = \dot{m}_{AE3}$$

$$\dot{m}_{FT2} = \dot{m}_{FT3}$$

Líquido saturado

$$\dot{m}_{FT2}(h_{FT2} - h_{FT3}) = \dot{m}_{AE2}(h_{AE3} - h_{AE2})$$

Balance en la bomba de fluido de trabajo

$$\dot{m}_{FT3} = \dot{m}_{FT4}$$

$$\eta = \frac{h_{FT3} - h_{FT4s}}{h_{FT3} - h_{FT4}}$$

Balance en la bomba de agua de enfriamiento

$$\dot{m}_{AE1} = \dot{m}_{AE2}$$

$$\eta = \frac{h_{AE1} - h_{AE2s}}{h_{FAE1} - h_{AE2}}$$

3.2.2 Estados termodinámicos del Ciclo Binario simple

Se comenzará por describir los estados termodinámicos que ya tenemos, especialmente en el ORC en el estado termodinámico FT1, el cual se definió como la entrada del fluido de trabajo a la turbina.

Estado FT1

Considerando que la calidad del fluido de trabajo en ese punto es 1, debido a que va saliendo del evaporador como vapor saturado y contamos con una presión de entrada establecida en las condiciones iniciales, con dichos datos, se pueden determinar los otros estados con ayuda de tablas de vapor del refrigerante R1233zd.

$$\left. \begin{array}{l} P_{FT1} = 2 \text{ MPa} \\ X_{FT1} = 1 \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} S_{FT1} = 1.7844 \text{ [kJ/kgK]} \\ h_{FT1} = 487.5249 \text{ [kJ/kg]} \\ T_{FT1} = 132.52 \text{ }^\circ\text{C} + 10^\circ\text{C de sobrecalentamiento} \end{array}$$

Estado FT2

En este momento es cuando se lleva a cabo la expansión isentrópica en la turbina, por lo que se considera que $S_{FT1} = S_{FT2}$. De igual manera, se considera la caída de presión en la turbina con una relación de presión de 2.3.

$$\left. \begin{array}{l} P_{FT2} = 0.36 \text{ MPa} \\ S_{FT1} = S_{FT2} \end{array} \right\} \longrightarrow h_{FT2s} = 452.4624 \text{ [kJ/kg]}$$

Ahora bien, la entalpía h_{FT2} sería la correspondiente a suponer que la expansión realmente fuese isentrópica, sin embargo, se debe considerar la entalpía real para el cálculo de la entropía, por lo que se hace uso de la siguiente expresión:

$$h_{FT2} = h_{FT1} - \eta_{turbina} * (h_{FT1} - h_{FT2R})$$

Por lo que, una vez despejando h_{FT2R} , se pueden determinar los estados termodinámicos restantes del FT2.

$$\left. \begin{array}{l} h_{FT2R} = 462.98 \text{ kJ/kgK} \\ P_{FT2} = 0.36 \text{ MPa} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} T_{FT2} = 77 \text{ }^\circ\text{C} \\ S_{FT2R} = 1.815 \text{ [kJ/kgK]} \end{array}$$

Estado FT3

En este punto, el fluido de trabajo va saliendo del condensador por lo que se encuentra en condiciones de líquido saturado, lo que le asigna una calidad igual a cero. De igual manera se sabe que los condensadores presentan una caída de presión de 0.5 Bar, por lo que podemos determinar la presión del fluido de trabajo a la entrada de la bomba.

$$\left. \begin{array}{l} X_{FT3} = 0 \\ P_{FT3} = 0.31 \text{ MPa} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} T_{FT3} = 51.87 \text{ }^\circ\text{C} \\ h_{FT3} = 264.75 \text{ [kJ/kg]} \\ S_{FT3} = 1.2162 \text{ [kJ/kgK]} \end{array}$$

Estado FT4

Finalmente, para cerrar el ciclo del ORC, el fluido sufrirá una compresión en la bomba de trabajo, lo que causará un aumento en su presión para que pueda regresar a las condiciones de presión necesarias para su ingreso a la turbina. Por esta razón se eleva la presión a la $P_{FT1} + 0.05 \text{ MPa}$ considerando que habrá una ligera pérdida de presión al salir del evaporador. De igual manera se considera en esta compresión un proceso adiabático, por lo que se tiene la consideración de que $S_{FT4} = S_{FT1}$.

$$\left. \begin{array}{l} P_{FT4} = P_{FT1} + 0.05 \text{ Mpa} = 2.05 \text{ Mpa} \\ S_{FT4} = S_{FT1} \end{array} \right\} \longrightarrow h_{FT4s} = 266.1975 \text{ [kJ/kg]}$$

Ahora bien, la entalpía h_{FT4} sería la correspondiente a suponer que la compresión realmente fuese isentrópica, sin embargo, se debe considerar la entalpía real para el cálculo de la entropía real, por lo que se hace uso de la siguiente expresión:

$$h_{FT4s} = h_{FT3} - \eta_{turbina} * (h_{FT3} - h_{FT4R})$$

Por lo que, una vez despejando h_{FT4R} , se pueden determinar los estados termodinámicos restantes del FT4.

$$\left. \begin{array}{l} h_{FT4R} = 262.669 \text{ [kJ/kg]} \\ P_{FT4} = 2.05 \text{ MPa} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} T_{FT4} = 49.911 \text{ }^\circ\text{C} \\ S_{FT4R} = 1.2053 \text{ [kJ/kgK]} \end{array}$$

Así como se determinan los estados para el ciclo, es necesario hacer el balance correspondiente al agua de enfriamiento del sistema y al sistema de la toma del recurso geotérmico. Pues aquí es donde se lleva a cabo el trabajo del sistema.

Para el agua de enfriamiento tenemos 3 puntos termodinámicos. El estado antes de entrar a la bomba de enfriamiento (AE_1), el estado después de la bomba y antes del condensador (AE_2) y el estado después de la condensación (AE_3) para después repetir el ciclo.

Estado AE₁

En este caso ya se tienen determinadas las condiciones iniciales del agua de enfriamiento, la cual se definen por la temperatura y la presión ambiente. Así es que se pueden determinar los estados restantes, con ayuda de tablas de vapor de agua.

$$\left. \begin{array}{l} P_{AE1} = P_{atm} = 0.1 \text{ MPa} \\ T_{AE1} = T_{amb} \approx 25^\circ\text{C} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} h_{AE1} = 104.918 \text{ [kJ/kg]} \\ S_{AE1} = 0.3671 \text{ [kJ/kgK]} \end{array}$$

Estado AE₂

Aquí el agua ya pasó por la compresión, lo que hace que se eleve la presión, en este caso es un aumento dos veces mayor. La compresión se considera isentrópica por lo que se determina que $S_{AE1} = S_{AE2}$.

$$\left. \begin{array}{l} P_{AE2} = 0.2 \text{ MPa} \\ S_{AE1} = S_{AE2} \end{array} \right\} \longrightarrow h_{AE2s} = 105.0192 \text{ [kJ/kg]}$$

Una vez más, se debe considerar que el proceso no es del todo isentrópico, por lo que se debe calcular la entalpía real para calcular los otros estados termodinámicos. Se hace uso de la misma expresión.

$$h_{AE2s} = h_{AE1} - \eta_{turbina} * (h_{AE1} - h_{AE2R})$$

Por lo que, una vez despejando h_{FT4R} , se pueden determinar los estados termodinámicos restantes del AE2.

$$\left. \begin{array}{l} h_{AE2R} = 105.0621 \text{ [kJ/kg]} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} T_{AE2} = 25.012^\circ\text{C} \\ S_{AE2R} = 0.3673 \text{ [kJ/kgK]} \end{array}$$

Estado AE₃

En este caso, se considera la caída de presión del cruce en el condensador, el cual se determinó de 0.5MPa. Ya se cuenta también con la temperatura a la que saldrá el agua.

$$\left. \begin{array}{l} T_{AE3} = 38^\circ\text{C} \\ P_{AE3} = 0.15 \text{ MPa} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} h_{AE3} = 159.30 \text{ [kJ/kg]} \\ S_{AE3} = 0.5455 \text{ [kJ/kgK]} \end{array}$$

Ahora bien, el último sistema para determinar es el referente al recurso geotérmico, el cual solo cuenta con dos estados. El primero es el correspondiente a la salmuera proveniente del silenciador y antes de entrar al evaporador. El segundo es la salmuera después de hacer la transferencia de calor al fluido de trabajo.

Estado RE₁

En este punto ya está determinada la temperatura y la presión a la que entra a la salmuera al intercambiador de calor, por lo que ya es posible encontrar los estados termodinámicos restantes.

$$\left. \begin{array}{l} T_{RE1} = 170^{\circ}\text{C} \\ P_{RE1} = 0.85 \text{ MPa.} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} h_{RE1} = 719.1152 \text{ [kJ/kg]} \\ s_{RE1} = 2.0416 \text{ [kJ/kgK]} \end{array}$$

Estado RE₂

En este caso es necesario tener en cuenta de nuevo la caída de presión que existe en el evaporador, la cual ya está definida. En cuanto a la temperatura, ésta se determina teniendo en cuenta el *pinch point* con el evaporador el cual es de 10 °C. Es así como se llega a las siguientes condiciones de salida en el evaporador.

$$\left. \begin{array}{l} T_{RE2} = T_{FT1} - 10^{\circ}\text{C} = 122.52^{\circ}\text{C} \\ P_{RE2} = 0.8 \text{ MPa.} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} h_{RE2} = 514.9478 \text{ [kJ/kg]} \\ s_{RE2} = 1.5545 \text{ [kJ/kgK]} \end{array}$$

El siguiente paso consistiría en hacer los cálculos correspondientes al calor de entrada, el calor de salida y a la potencia en ambas bombas para de esta manera poder calcular la potencia eléctrica bruta que se refiere a la potencia total que entrega el ORC, la potencia generada la cual considera la pérdida de potencia por las bombas y finalmente la neta, en donde se considera la eficiencia del generador eléctrico.

En cuanto a los flujos másicos, éste se propone para el fluido de trabajo, donde el objetivo es que se generen los 100kWe netos. La expresión siguiente nos da un aproximado de lo que sería necesario para el sistema, sin embargo, hay que considerar las pérdidas de potencia en las bombas y las pérdidas por eficiencia del intercambiador, por lo que al resultado se le agrega más para conseguir la potencia deseada.

$$\dot{m}_{RFT} = \frac{\dot{W}_{neta}}{(h_{FT1} - h_{FT4}) - (h_{FT2} - h_{FT3})} \quad (6)$$

Una vez que se obtiene el flujo másico para el fluido de trabajo, se hacen los balances en el evaporador y en el condensador correspondientes para obtener el flujo másico de recurso geotérmico y de agua de enfriamiento, respectivamente.

En la tabla siguiente se resumen los resultados para todo el análisis completo del ORC. Considerando las ecuaciones plasmadas en el punto 3.2.1. Con dichos resultados será posible calcular las eficiencias del sistema.

		Resultado	Unidades
Calor transferido al ciclo orgánico	Q_{ent}	1146	[kWt]
Calor entregado al agua de enfriamiento	Q_{sal}	1011	[kWt]
Potencia de la bomba del fluido de trabajo	\dot{W}_{BFT}	10.58	[kW]
Potencia de la bomba del agua de enfriamiento	\dot{W}_{BAE}	2.67	[kW]
Potencia eléctrica bruta	\dot{W}_B	125	[kW]
Potencia Generada	\dot{W}_G	112	[kW]
Potencia Neta	\dot{W}_N	100.72	[kW]

Tabla 3.2 Análisis del ORC.

Los cálculos anteriores se llevaron a cabo también haciendo una simulación, de donde se obtuvo el diagrama de flujo de proceso siguiente, con los resultados más característicos del análisis termodinámico.

CICLO IDEA100 - R1233zd (SALMUERA)

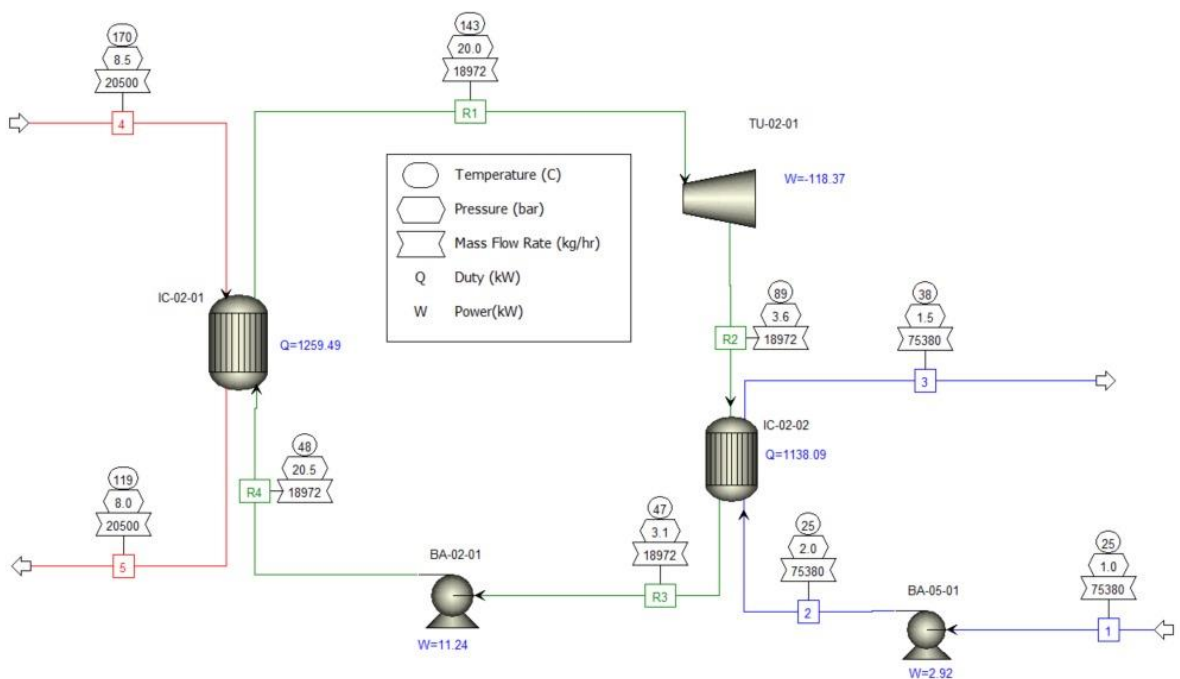


Figura 3.5 Balance de Masa y Energía IDEA 100 simulado.

Los resultados anteriores corroboran el balance de masa y energía programado en una hoja de cálculo para obtener los estados termodinámicos de los fluidos, los cuales se describieron en este punto. Los resultados tienen una ligera variación, con un porcentaje de error del 9% por lo que el análisis se considera correcto.

Del balance anterior se puede concluir lo siguiente:

- Salmuera: Entra al evaporador a una temperatura de 170 °C, presión de 8.5 Bar, flujo de 20.5 ton/h y sale a 119 °C y 8 Bar.

- Agua de enfriamiento: Se introducen 75 ton/h de agua a la bomba a presión atmosférica y temperatura ambiente, posteriormente entra al condensador a las mismas condiciones, pero con un aumento en la presión de 1 Bar y sale con 38 °C y 1.5 Bar.
- Fluido de trabajo: Se utilizan 19 ton/h de refrigerante R1233zd, el cual ingresa a la bomba a 47 °C y 3.1 Bar, y aumenta la presión a 20.5 bar para ser introducido al intercambiador de calor, en donde la temperatura se eleva a 143 °C y es expandido en la turbina, generando una caída de presión a 3.6 Bar y 89 °C.

Con esta información, ya es posible buscar los equipos que mejor se ajusten a las necesidades del sistema en cuanto a presión, temperatura y flujo másico.

3.2.2 Eficiencia de primera ley

La eficiencia de primera ley de cualquier ciclo de potencia se calcula con el cociente entre la potencia neta de salida y el calor de entrada en el ciclo, el cual corresponde al calor en el evaporador.

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{neto}}{Q_{ent}} = 1 - \frac{Q_{sal}}{Q_{ent}} \quad (7)$$

Recordemos que el trabajo neto se obtiene de la resta del trabajo consumido por las bombas y el trabajo producido en la turbina.

$$\dot{W}_{neto} = \dot{W}_B - \dot{W}_{BFT} - \dot{W}_{BAE} \quad (8)$$

Es así como obtenemos el siguiente resultado:

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{neto}}{Q_{ent}} = \frac{100 [kW]}{1147 [kWt]} = 0.0878 * 100 = \mathbf{8.78\%}$$

Un ciclo Rankine simple común puede alcanzar eficiencias de hasta el 30% [55], no obstante, los Ciclos Binarios se distinguen por poseer bajas eficiencias, lo cual se justifica por el pequeño rango de temperaturas en el que opera.

3.2.3 Identificación de irreversibilidades

En termodinámica, un proceso irreversible se define como un proceso que no se puede revertir, es decir, que no puede devolver tanto el sistema como el entorno a sus condiciones iniciales.

En este caso en específico las irreversibilidades son debidas a la transferencia de calor que existe en los intercambiadores. Durante un proceso irreversible aumenta la entropía del sistema, esto debido a factores como podrían ser los siguientes:

- Presencia de calor y pérdidas de calor. En sistemas termodinámicos reales, no se puede ignorar la presencia de fricción mecánica o pérdidas de calor.
- Diferencia de temperatura finita. En ocasiones las eficiencias de las máquinas térmicas suelen ser más bajas porque los procesos no se realizan infinitamente lento.
- Mezcla de sustancias diferentes.

La irreversibilidad de los procesos naturales se indica según la Segunda Ley de la termodinámica, la cual menciona:

La entropía de cualquier sistema aislado nunca disminuye. En un proceso termodinámico natural, aumenta la suma de las entropías de los sistemas termodinámicos que interactúan.

Esta ley nos recuerda que los procesos reversibles son una ficción teórica útil y conveniente, sin embargo, no ocurren en la naturaleza. De esta ley se deduce que es imposible construir un dispositivo que funcione en un ciclo y cuyo único efecto sea la transferencia de calor de un cuerpo más frío a un cuerpo más caliente.

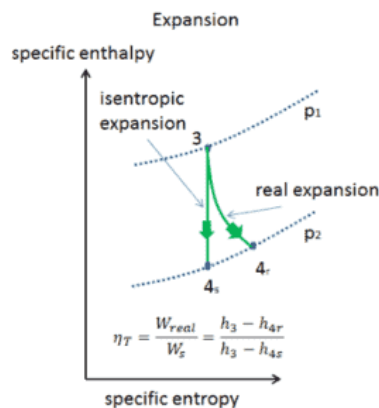


Figura 3.6 Proceso isentrópico contra un proceso real

Aquí es cuando se introduce la definición de la exergía, la cual nos da el máximo trabajo útil que podemos extraer de un sistema, apurando al límite las posibilidades que ofrece el segundo principio de la termodinámica. Para ello hay que suponer procesos reversibles y, por lo tanto, sin producción de entropía.

En un proceso real siempre se produce entropía. La producción de entropía implica una reducción del trabajo útil que podemos extraer del sistema, es decir, cuanto mayor es la producción de entropía, menor es el aprovechamiento de su exergía.

Cuando se habla de exergía se habla de dos sistemas, uno ideal, el cual es el medio ambiente, y otro cerrado, la exergía es el trabajo teórico máximo que se puede obtener de su mutua interacción hasta alcanzar el estado de equilibrio.

El medio ambiente se supone libre de irreversibilidades, y se define como un sistema simple, compresible, de grandes dimensiones, que se mantiene siempre a una presión p_0 y a una temperatura t_0 uniformes. Estos valores pueden coincidir o no con las condiciones ambientales del entorno

La eficiencia de la segunda ley está ideada para servir como una medida de aproximación a la relación reversible, por lo que se evalúa con cero en el peor de los casos, refiriéndose a que hubo una destrucción completa de exergía, a uno, como el mejor de los casos donde no hay destrucción de la exergía. Entonces, la eficiencia exergética se define con la siguiente ecuación.

$$\eta_{II} = \frac{\text{Exergía recuperada}}{\text{Exergía suministrada}} = 1 - \frac{\text{Exergía destruida}}{\text{Exergía suministrada}} \quad (9)$$

Es así, como para calcular la eficiencia por segunda ley de la termodinámica de un ciclo, se requiere conocer la eficiencia térmica, la cual se calculó anteriormente, así como la eficiencia máxima posible (reversible), tal que:

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_c} = \frac{W_{útil}}{W_{Rev}} \quad (10)$$

En la termodinámica básica, la eficiencia máxima que puede tener un ciclo de potencia está dado por el teorema de Carnot.

$$\eta_c = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (11)$$

Donde:

T_L : Temperatura absoluta del sumidero frío (condensación)

T_H : Temperatura absoluta de la fuente caliente

Entonces, en el caso de nuestro ciclo se tienen los siguientes datos:

T_L : $T_{FT3} = 51.87^\circ\text{C} = 325.02 \text{ K}$

T_H : $T_{RE1} = 170^\circ\text{C} = 443.15 \text{ K}$

Por lo tanto, la eficiencia máxima de Carnot sería la siguiente:

$$\eta_c = 1 - \frac{325.02}{443.15} = 0.2666 = 26.6\%$$

Ahora bien, de acuerdo con la ecuación 10, la eficiencia exergética resultaría del cociente de ambas eficiencias.

$$\eta_{II} = \frac{8.78\%}{26.6\%} = 33\%$$

El resultado anterior indica que el ciclo binario diseñado convierte 33% del potencial disponible de trabajo en trabajo útil

3.3 Diseño de placa orificio para medición del caudal

La placa orificio es uno de los instrumentos de medición más antiguos, el cual puede ser utilizado para medir el gasto en estado líquido en tuberías. La placa orificio es un dispositivo simple hecho de placa metálica delgada en forma circular que se inserta de manera perpendicular al flujo en una tubería de conducción; dicha instalación se lleva a cabo mediante una conexión bridada. Una de las principales ventajas de las placas orificio es su bajo costo.

La placa orificio es un eficiente instrumento de medición de gasto, sin embargo, lleva asociada consigo una pérdida de presión del fluido, donde para algunos sistemas pudiera resultar inadmisibles; para el ciclo binario que se está diseñando estas pérdidas de presión no comprometen la operatividad del sistema, por lo que se considera como una buena solución. Es relevante mencionar que la salmuera es un fluido altamente corrosivo, que podría dañar equipos de medición de caudal más sofisticados y costosos.

La placa orificio presentada a continuación se diseñó para poder determinar el flujo másico en el módulo ORC, específicamente a la salida del condensador donde el refrigerante se encuentra en estado de líquido saturado. Las condiciones de termodinámicas de diseño en este punto son:

Presión [Bar]	3.1
Temperatura [°C]	47
Flujo másico [kg/s]	5.27
Diámetro de línea	4" (101.6 mm)

Tabla 3.3 Condiciones de diseño para la placa orificio.

La metodología de cálculo utilizada se basó en la norma ISO 5167-2 "Measurement of fluid Flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full- Orifice Plates", la cual determina la geometría y el método de empleo, es decir, las condiciones de funcionamiento e instalación de las placas orificio.

El primer aspecto para considerar es la relación de diámetros β

$$\beta = \frac{d}{D} \tag{12}$$

Conforme a lo indicado en el apartado 5.1.8.1 de la norma ISO 5167-2 (2003), para considerar el cálculo como correcto, se deben cumplir las siguientes condiciones.

$$d \geq 12.5 \text{ mm}$$

$$0.10 \leq \beta \leq 0.75$$

$$Re_D \geq 5\,000 \text{ para } 0.1 \leq \beta \leq 0.56$$

$$Re_D \geq 16\,000 \beta^2 \text{ para } \beta > 0.56$$

El valor de β se puede iterar para conseguir la menor caída de presión posible en el sistema, sin embargo, ese aspecto se considerará más adelante.

En una placa orificio el cálculo del caudal se determina debido a la diferencia de presión estática que genera la instalación de la placa en la tubería. En la sección 4 de la norma ISO 5167-2 se determina la ecuación para calcular el caudal.

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P \rho} \quad (13)$$

Donde:

C: Coeficiente de descarga (adimensional). Se calculó de acuerdo con una relación donde se considera el número de Reynolds y la relación de diámetros de la placa. Las tablas correspondientes se encuentran en el anexo 3.1.

β : es la relación de diámetros (adimensional)

ΔP : es la diferencia de presión entre ambos lados de la placa orificio. [Pa]

d: diámetro del orificio [mm]

ρ : Densidad del refrigerante [kg/m³]

3.3.1 Consideraciones para el diseño

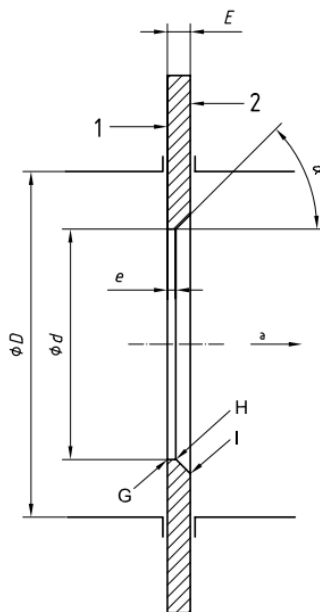


Figura 3.7 Diseño de una placa orificio. Extraído de ISO 5167-2 (2003).

E: Espesor de la placa [mm o in]

e: Espesor del orificio [mm o in]

1: Cara de presión aguas arriba

2: Cara de presión aguas abajo

a: Dirección del fluido

D: diámetro de la tubería [mm o in]

d: diámetro del orificio [mm o in]

α : Ángulo entre el espesor E y e. El valor debe ser $45^\circ \pm 15^\circ$

Bordes G, H, I

Espesor E y e

El espesor del orificio de la placa "e" debe ser entre $0.005 D$ y $0.02 D$

El espesor de la placa E debe ser entre el valor de "e" y $0.05 D$.

Sin embargo, cuando $50 \text{ mm} \leq D \leq 64 \text{ mm}$, un espesor E arriba de 3.2 mm es aceptable.

3.3.2 Cálculo de la placa y resultados

Antes de hacer los cálculos, se deben considerar las condiciones del fluido de trabajo en ese tramo de tubería, el cual como se había mencionado anteriormente se encuentra como líquido saturado. Considerando las condiciones de presión y temperatura correspondientes se determina la densidad del refrigerante como 1194.75 [kg/m³].

Al ya conocer el gasto másico de refrigerante que circularía por la tubería, el factor importante para un buen diseño de placa es que la caída de presión sea la menor posible. Se considera que el ΔP en una placa orificio debería ser como máximo de 0.5 Bar, por lo que se iterará con la relación de diámetros para encontrar la alternativa que cumpla con dicho parámetro, así como con los enunciados antes en el documento.

Es así como se despeja ΔP de la ecuación (2), para así encontrar la relación de la caída de presión cuando el β varia. El despeje queda como se muestra a continuación:

$$\Delta P = \left(\frac{q_m}{\frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\rho} \sqrt{2}} \right)^2 \quad (14)$$

Se consideraron los valores de 0.3, 0.35 y 0.4 para β . Los resultados se enuncian en la tabla siguiente. Para el espesor E se consideró la relación de 0.05D y para e la relación de 0.02D.

Parámetro			
β	0.3	0.35	0.4
d [mm]	30.48	35.56	40.64
D [mm]	101.6	101.6	101.6
Re	54000	63000	72000
ρ [kg/m³]	1194.75	1194.75	1194.75
μ [Pa.s]	0.000335	0.000335	0.000335
C	0.5998	0.6012	0.6024
q_m [kg/s]	5.27	5.27	5.27
ΔP [Pa]	60000	32000	18000
E [mm]	5.08	5.08	5.08
e [mm]	2.032	2.032	2.032

Tabla 3.4 Resultados para diseño de placa orificio.

Comparando las alternativas en cuanto a la placa orificio que se quiere diseñar para el módulo ORC del IDEA 100, se considera que la mejor sea aquella donde la pérdida de presión sea mínima, debido a las condiciones de operación ya determinadas para los equipos, especialmente a la salida del condensador, donde la presión se encuentra a 3.1 Bar.

Se plantearon tres alternativas de placa orificio, con una relación de diámetros de 0.3, 0.35 y 0.4. En la tabla 1 se puede observar que mientras mayor sea β , menor es la caída de

presión, lo que es lógico debido a que la restricción de la placa será menor, sin embargo, las tres opciones ayudarían a medir el gasto másico necesario para el ciclo termodinámico. Para el caso de la placa con un β de 0.3, se obtiene que la pérdida de presión será de 0.6 Bar, valor que sobrepasa por un poco la condición de que la caída de presión sea menor a 0.5 Bar, por lo que se descarta esta opción. En cuanto a la placa para un β de 0.35 se determina que la pérdida de presión a través de la placa será de 0.32 Bar aproximadamente, valor que entraría en el rango y sería aceptable, no obstante, se considera la última opción que es una placa con β de 0.4, donde la caída de presión representa tan solo 0.18 Bar, valor que cumple con las condiciones de diseño de placas orificio enunciadas en la norma considerada.



Figura 3.8 Diseño en CAD de la placa orificio para el ciclo binario de 100 kW.

3.3.3 Instalación de la placa orificio

La instalación general de un dispositivo diferencial de presión, y especialmente para una placa orificio, se estipula en la cláusula 7 del ISO 5167-1, donde se enuncia la longitud requerida de tubería aguas arriba y aguas abajo de la placa, tomando en cuenta los accesorios de tubería que se encuentren en el tramo de tubería designado para su instalación, esto con el objetivo de evitar incertidumbre en las mediciones que se recopilen en la placa.

En el anexo 3.2 se puede encontrar la tabla descrita que especifica dichas longitudes y escenarios distintos para la instalación de la placa. En dicho documento no se encuentra la configuración que se tiene en el diseño, pues el lugar donde se planea instalar la placa orificio es a la salida del condensador, antes de entrar al tanque de almacenamiento, y no viene ninguna recomendación para cuando la placa se encuentre a la salida de un equipo, sin embargo, considerándolo como que el fluido pasara por una reducción, la distancia requerida necesaria aguas arriba va de 6 a 9 diámetros de la placa orificio (P.O.) y para las aguas abajo se recomienda de 3 a 6 diámetros.

No conforme con estos datos, se buscó en la hoja de datos de una placa que compartiera características de diseño similares a la nuestra, por lo que se encontró la placa orificio Rosemount 1497, la cual también es una placa orificio concéntrica. Para esta placa se menciona que sólo es importante que se cumpla con los tramos de tubería libres recomendados para aguas arriba y aguas abajo, para de este modo garantizar las correctas mediciones de presiones para poder determinar el flujo másico. A continuación, se muestra la tabla extraída de dicho manual.

Distancias estándar de tramos de tubería 1497

Tamaño de la tubería	Distancia corriente arriba	Distancia corriente abajo	D.I.
51 mm (2 in.)	518 mm (1.7 ft.)	274 mm (0.90 ft.)	52,5 mm (2.067 in.)
76 mm (3 in.)	792 mm (2.6 ft.)	396 mm (1.30 ft.)	77,9 mm (3.068 in.)
102 mm (4 in.)	1036 mm (3.4 ft.)	518 mm (1.70 ft.)	102,3 mm (4.026 in.)
127 mm (5 in.)	1280 mm (4.2 ft.)	640 mm (2.10 ft.)	128,3 mm (5.047 in.)
153 mm (6 in.)	1554 mm (5.1 ft.)	762 mm (2.50 ft.)	154,1 mm (6.065 in.)
203 mm (8 in.)	2042 mm (6.7 ft.)	1006 mm (3.30 ft.)	202,7 mm (7.981 in.)
254 mm (10 in.)	2560 mm (8.4 ft.)	1280 mm (4.20 ft.)	254,5 mm (10.020 in.)
305 mm (12 in.)	3048 mm (10.0 ft.)	1524 mm (5.00 ft.)	304,8 mm (12.000 in.)
356 mm (14 in.)	3353 mm (11.0 ft.)	1676 mm (5.50 ft.)	336,6 mm (13.250 in.)
406 mm (16 in.)	3871 mm (12.7 ft.)	1951 mm (6.40 ft.)	393,7 mm (15.250 in.)
457 mm (18 in.)	4389 mm (14.4 ft.)	2195 mm (7.20 ft.)	438,1 mm (17.250 in.)
508 mm (20 in.)	4877 mm (16.0 ft.)	2438 mm (8.00 ft.)	488,9 mm (19.250 in.)
610 mm (24 in.)	5913 mm (19.4 ft.)	2957 mm (9.70 ft.)	590,5 mm (23.250 in.)

Figura 3.9 Distancias estándar de tramos de tubería. Extraída de Manual de instrucciones Rosemount 1595.

De la tabla anterior se puede concluir que para una tubería de 4 pulgadas (tamaño de la línea de tubería donde se planea su instalación FT₃), se recomienda dejar una distancia aguas arriba de 1036 mm y una distancia aguas debajo de 518 mm. Dichos datos cumplen aproximadamente con lo determinado por el ISO 5167-1 por lo que se tomaron como la referencia que se usaron en la propuesta del ciclo.

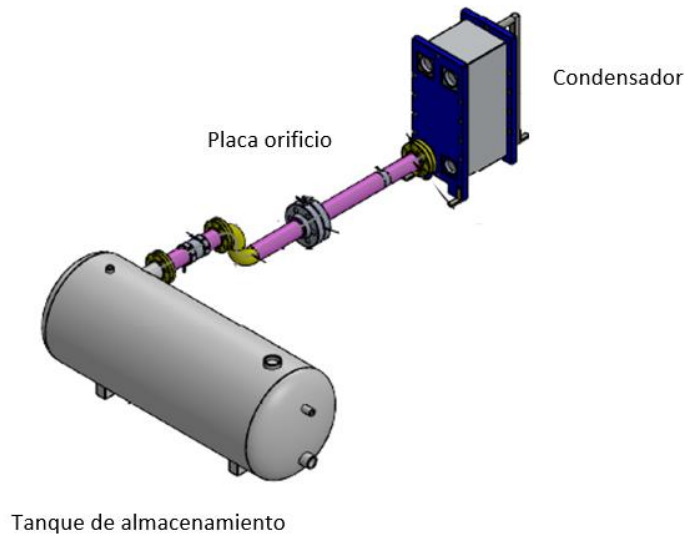


Figura 3.10 Posición de la placa orificio en el IDEA 100

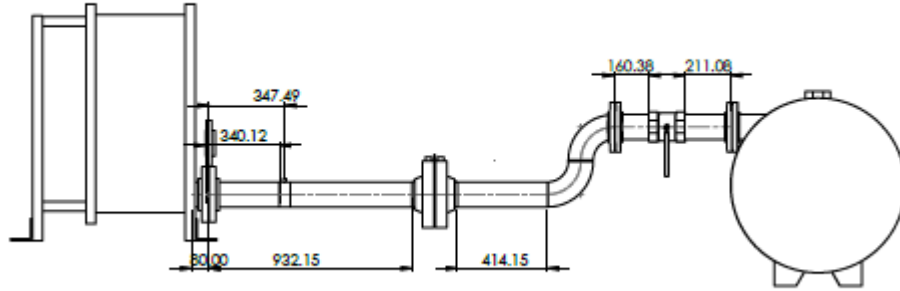


Figura 3.11 Dimensionamiento de posición de placa orificio.

Cada una de las bridas porta placas tiene una dimensión aproximada de 100 mm, lo que compensa la distancia necesaria aguas arriba y aguas abajo recomendadas con anterioridad.

3.4 Selección de equipo

Habiendo calculado el balance de masa y energía correspondiente al diseño del sistema ORC propuesto, ya es posible determinar el tipo de equipos que son necesarios para satisfacer los requisitos del sistema, pues ya se cuentan con las condiciones de operación principales en cuanto a gastos másicos, temperatura y presión.

Como se ha mencionado anteriormente, el Ciclo Rankine Orgánico del IDEA 100 trabaja como un ciclo simple, lo que se traduce en que sólo se necesitan los equipos característicos de un Ciclo Rankine, los cuales son enunciados a continuación e identificados de acuerdo con el MANUAL DE INGENIERÍA IDEA100-D-MAN-02-00-00, el cual es el documento base que rige las actividades de documentación y administración del proyecto.

- Intercambiador de calor de placas (evaporador): IC-02-001.
- Turbina: TU-02-002.
- Intercambiador de calor de placas (condensador): IC-02-002.
- Bomba de recirculación de refrigerante: BA-02-001.
- Bomba de agua de enfriamiento: BA-05-001
- Generador eléctrico: GE-02-001

De igual manera va a ser necesario implementar un tanque de almacenamiento en el ORC, para que sea el encargado de suministrar el fluido de trabajo a todo el sistema. También se considera la instalación de una torre de enfriamiento para el sistema de condensación. Dichos equipos se identifican de la misma manera que los anteriores, haciendo uso del Manual de ingeniería.

- Tanque de almacenamiento: RP-02-001
- Torre de enfriamiento: TE-05-001

3.4.1 Selección de expansor

Como se mencionó en el capítulo 2, la selección de un expansor es determinante para un ORC, y se toman en cuenta distintos factores, como lo son el propósito de la planta y las condiciones de operación de ésta.

Se mencionaron distintos tipos de expansores, del tipo volumétrico o turbomáquinas. Se especificó que las turbinas (turbo maquinaria) suelen ser muy efectivas cuando se trata de plantas de mediana y grande escala. Sin embargo, para la planta de 100 kW que se está diseñando en el grupo IIDEA, se decidió utilizar una turbina de tipo axial monoetapa de 120kW. La razón de dicha elección es que esta turbina está diseñada específicamente para escalas pequeñas, y puede solicitarse de la capacidad que sea necesaria para el proyecto, pues cuenta con modelos desde los 5kW hasta los 120 kW, además de que es compatible con múltiples fluidos de trabajo, entre ellos el que se seleccionó para el ciclo.

Otra de las características más representativas de este tipo de turbina, es que ya tiene incluido un generador eléctrico, por lo que se necesita un equipo menos en el ORC, lo que se traduce en un diseño más compacto.

Algunos de los datos técnicos de la turbina se mencionan en la tabla siguiente.

Rango de potencia	3-175kW eléctricos
Tamaño	5kW, 30kW, 60kW ATEX, 120 kW , 175kW
Tipo de ciclo	-Ciclo abierto -Ciclo cerrado
Fluidos compatibles	Aire comprimido, CO ₂ , Vapor de agua, gas natural, refrigerantes: R245fa, R1233zd , R134a, NOVEC 649, siloxanos, cyclopentano, entre otros.
Temperatura de salida	Máximo 150°C, dependiendo del fluido de trabajo.
Precondiciones	-Seco -Libre de contaminación

Tabla 3.5 Datos técnicos de la turbina.

Observando los datos técnicos de la tabla anterior, se puede afirmar que la turbina es adecuada para implementarse con el ORC, pues cumple con las condiciones de operación determinadas.

Este tipo de turbina se manda a diseñar específicamente para la aplicación, proporcionando los datos necesarios como presiones, temperaturas y flujo másico.

La turbina seleccionada presenta las siguientes ventajas:

- Alta eficiencia: Al ser diseñada para las necesidades específicas. El grado de eficiencia suele rondar por el 80%.
- Fácil mantenimiento: El conjunto turbina-generador opera sin ningún tipo de engrane de por medio. El generador se posiciona directamente en el eje de la turbina.

- Diseño compacto: Sin una unidad de recuperación, el diseño es fácil de instalar, compatible con el propósito de hacer un ciclo modular.
- Versátil: Puede utilizarse como una turbina de una etapa ya sea axial o radial.

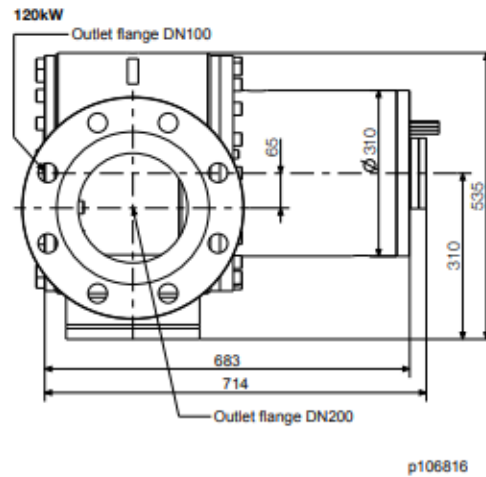


Figura 3.12 Dimensiones de la turbina de 120kW.

3.4.2 Selección de intercambiadores de calor.

La selección de los intercambiadores de calor para una planta termoeléctrica es de suma importancia, pues aquí se generará la entrada y salida de calor al sistema.

En el mercado se encuentran principalmente dos tipos de intercambiadores de calor:

- Intercambiador de placas
 - Soldadas: De difícil mantenimiento, generalmente se utilizan tratamientos químicos que son caros.
 - Con Juntas: Se pueden desarmar fácilmente y reemplazar una placa en caso de ser necesario.
- Intercambiador de tubos y coraza: Suelen utilizarse más para refrigeración o uso de salmuera. Está conformado por una coraza y una determinada cantidad de tubos por donde se realiza la transferencia de calor.

En los intercambiadores de calor de placas la transferencia de calor se da mediante grandes superficies de placas corrugadas, donde proporcionan una transferencia de calor eficiente en equipos con un tamaño reducido.

Para el caso específico del modelo propuesto se optó por usar intercambiadores de calor de placas con soldadas, esto debido principalmente a que el diseño debe ser compacto para poder hacer un módulo que contenga todo el ORC, y en el caso de los intercambiadores de tubos y coraza suelen tener dimensiones bastante grandes. En la tesis *Evaluación termoeconómica de intercambiadores de calor para sistemas ORC operados con recursos de baja y media entalpia* [56] se especifican las dimensiones aproximadas de

diseño para un intercambiador de tubo y coraza, dando como resultado un intercambiador con tubos de 1 pulgada de diámetro, una coraza de 31 pulgadas de diámetro para el caso del evaporador, y 33 pulgadas para el condensador, así como una longitud de 18 pies. Con estos resultados es fácil justificar la elección de un intercambiador de placas, que tiene una longitud aproximada de 3 pies.

Otro punto determinante es el material de fabricación de los intercambiadores de calor. Cuando se trabaja con salmuera se debe tener especial cuidado pues ésta, por su composición química, suele contener partículas que resultan corrosivas para el metal, lo que ocasiona que se hagan incrustaciones en los equipos. La mejor alternativa para estos casos es utilizar un intercambiador de calor de titanio. Sin embargo, para el proyecto se cuenta con un presupuesto limitado, y el titanio es de lo más caro que hay en el mercado, por lo que se eligieron intercambiadores de calor de acero inoxidable, no obstante, se está proponiendo un plan de mantenimiento preventivo mediante la adición de químicos para neutralizar los impactos corrosivos de la salmuera en estos equipos.

En el análisis energético se puede observar que el evaporador necesita operar a unas temperaturas de 48°C hasta 170°, con una presión de 8 a 20.5 bar y un flujo másico de 19000-20500 [kg/hr]. Se decidió seleccionar un intercambiador de calor de placas, hecho de aleación 316.

Las características principales de operación se enuncian en la tabla siguiente.

Fluido	Entrada [mm]	Temperatura [°C]	Salida [mm]	Temperatura [°C]	Flujo másico [kg/h]	Caída de presión [psi]
Agua	90	170	90	119	21,668	0.34
R1233zd	90	135.8	90	143.8	18,969	0.7

Tabla 3.6 Datos técnicos del evaporador.

Para el condensador, nuevamente se consideró un intercambiador de calor de placas, el cual necesita operar a condiciones más altas de presión y temperatura. Dicho condensador cumple con las condiciones de operación necesarias, las cuales se mencionan a continuación.

Fluido	Entrada [mm]	Temperatura [°C]	Salida [mm]	Temperatura [°C]	Flujo másico [kg/hr]	Caída de presión [Bar]
R1233zd	100	89	100	45	17,926	0.16
Agua	100	25	100	38	75,387	0.18

Tabla 3.7 Datos técnicos del condensador.

Ahora bien, para la selección de los equipos, es sumamente importante calcular la carga térmica de cada uno, el cual ya se determinó en el apartado del balance de masa y energía. La ecuación para determinar la carga térmica necesaria para disipar el fluido correspondiente a cada equipo se describe a continuación:

$$Q = \dot{m} * (h_2 - h_1) \quad (15)$$

Donde:

Q: Carga térmica [kWt]

ṁ: Flujo másico [kg/s]

h₂: Entalpía fuente alta de temperatura. [kJ/kgK]

h₁: Entalpía fuente baja de temperatura [kJ/kgK]

Para el caso del evaporador, al utilizar la ecuación 15, se determina que, de acuerdo con el balance de masa, la entalpía de la fuente a alta temperatura corresponde a 487.53 [kJ/kgK] (h_{FT1}) y la entalpía de la fuente a baja temperatura es igual a 262.67 [kJ/kgK] (h_{FT4}). Considerando entonces el flujo másico del refrigerante, se sustituyen los valores y se obtiene lo siguiente:

$$Q_{evap} = 5.2 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] * \left(487.53 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] - 262.67 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] \right)$$

$$Q_{evap} = 1,146.78 \text{ kWt}$$

Calculando del mismo modo la carga térmica ahora para el condensador, con sus datos correspondientes, h₂=h_{FT2} Y h₁=h_{FT3}, se obtiene el resultado siguiente:

$$Q_{cond} = 5.2 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] * \left(462.98 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] - 264.74 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] \right)$$

$$Q_{cond} = 1,011 \text{ kWt}$$

3.4.3 Selección de bombas

En nuestro análisis se puede observar que se cuentan con dos bombas en el ORC. Una que transporta el fluido de trabajo (R1233zd) y otra que sirve para suministrar el agua de enfriamiento al condensador.

Las bombas en un sistema hidráulico se encargan de mantener la continuidad del flujo, velocidad y presión de un fluido que circula a través de ella. En el mercado existen distintos tipos de bombas, las cuales se dividen de acuerdo con el sector o aplicación que se le vaya a dar. Se encuentran disponibles distintas bombas que se clasifican por su forma de trabajo. A continuación, se describen brevemente cada una de ellas.

- **Bombas centrífugas:** Son de las más utilizadas en distintos sectores y en el hogar. Sirven para impulsar fluidos a través de un proceso de transformación de energía mecánica en energía cinética. Están diseñadas por un impulsor por el cual circula el fluido. Dentro de este tipo de bombas existen más clasificaciones, por ejemplo, la

dirección del fluido (axial, radial o mixto), la posición del eje, tipo de estructura de la coraza y el nivel de succión (Raiker, 2021).

- **Bombas de desplazamiento positivo:** Este tipo de bombas se caracteriza por tener una caja fija con engranajes, aspas, pistones, levas, paletas, entre otras piezas. A diferencia de las bombas centrífugas, estas no impulsan el fluido, sino que bombean un volumen definido independientemente de las revoluciones del motor, de manera independiente a la presión.

Para el proyecto del IDEA100, para la parte de la circulación del fluido de trabajo se seleccionó una bomba de tipo centrífuga horizontal, ya que a pesar de que el refrigerante suele tener una viscosidad un tanto elevada, la bomba centrífuga seleccionada está diseñada para operar con dicho fluido a las condiciones determinadas; tomando en cuenta que se consideran presiones no tan elevadas. Las bombas de tornillo o de desplazamiento positivo suelen ser ideales para fluidos de muy altas viscosidades, razón por la que suelen ser más robustas, y para propósitos del diseño no es adecuado.

A continuación, se observan las curvas de operación de la bomba seleccionada, donde se puede determinar que abarca correctamente el caudal del diseño del ciclo. La bomba seleccionada se ilustra con el número 16, y su caudal correspondiente es aproximado a 93 GPM.

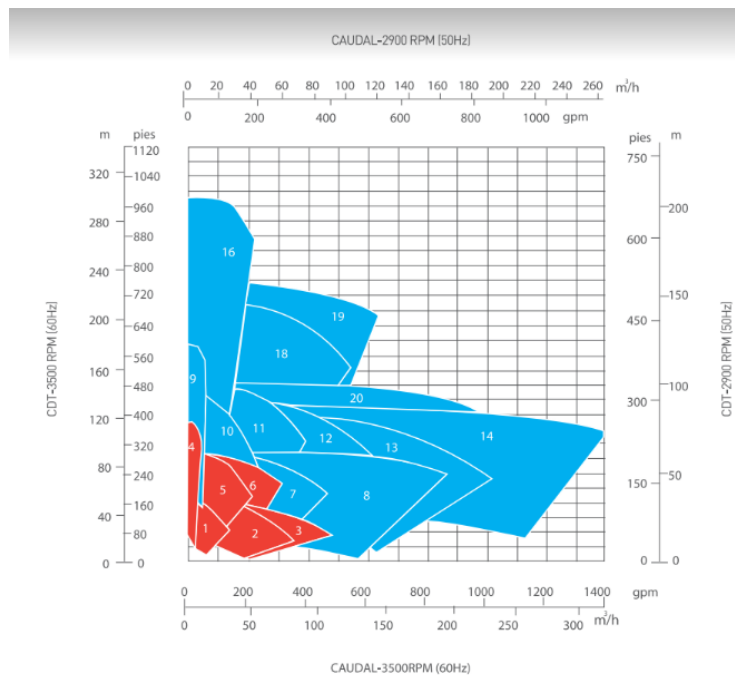


Figura 3.13 Curvas de caudal vs RPM de bomba para ORC.

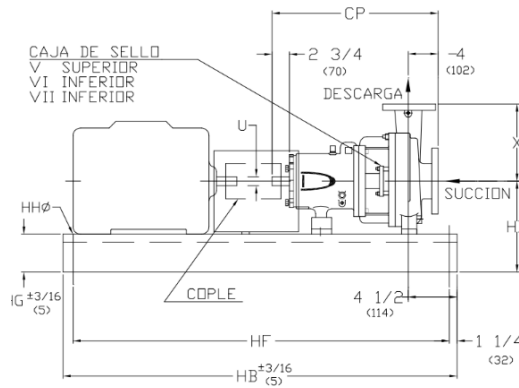


Figura 3.14 Diagrama preliminar de la bomba para el ORC.

En el caso de la bomba para el agua de enfriamiento, las condiciones de operación son más sencillas, y al tratarse de agua el fluido de bombeo y temperaturas ambiente, se encontraron más opciones en el mercado. Nuevamente se seleccionó una bomba centrífuga horizontal de 3 fases, para una potencia de 7.5 HP, esto debido a que el trabajo de bombeo que se realiza para el agua de enfriamiento es de aproximadamente 3 kW. Entonces, considerando que 1 HP es igual a 0.75 kW, se hace la conversión correspondiente, lo que daría un aproximado de 4 HP necesarios, sin embargo, por motivos de diseño y evitar que éste se encuentre muy justo, se seleccionó una bomba que aguante hasta 7.5 HP.



Figura 3.15 Bomba centrífuga para el agua de enfriamiento.

3.4.4 Selección de torre de enfriamiento

La torre de enfriamiento es un equipo importante en el ciclo, pues es uno de los equipos principales en el SC. La torre de enfriamiento es la unidad del sistema de enfriamiento por agua que expulsa el calor hacia la atmósfera. La bomba es la encargada de transportar el agua de condensación a la torre de enfriamiento.

Una torre de enfriamiento es una instalación cuya función es la dispersión del calor del agua, que involucra fenómenos de transferencia de calor y de masa. Para lograr los efectos de enfriamiento, es importante que la gota del líquido tenga un tamaño menor durante su caída para aumentar el área de contacto con el aire, lo cual se logra interponiendo obstáculos o un relleno que detiene el agua y al mismo tiempo la rompe para facilitar el proceso de evaporación.

Existen distintos tipos de torres de enfriamiento, las cuales se acoplan a las características y necesidades del sistema.

- Atmosféricas: El movimiento del aire depende del viento y del efecto de las boquillas aspersoras. Se usan en pequeñas instalaciones.
- Tiro natural: El flujo de aire necesario se obtiene como resultado de la diferencia de densidades entre el aire más frío del exterior y el húmedo del interior de la torre. Usan chimeneas de gran altura para lograr el tiro deseado. Suelen ser torres de gran tamaño, por lo que son comúnmente usadas en centrales térmicas.
- Flujo cruzado: El aire entra a los lados de la torre fluyendo horizontalmente a través del agua que cae. Las corrientes de aire tienden a ser mayores.

- Tiro mecánico

El agua que llega a la torre de enfriamiento puede distribuirse por boquillas aspersoras que dejan pasar el flujo de agua hacia el fondo de la torre. Existen dos tipos.

Tiro inducido: El aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre. Son las más comunes.

Tiro forzado: El aire entra por un ventilador situado en el fondo de la torre y se descarga por la parte superior. Se reduce la efectividad de la torre, pues están sujetas a la recirculación del aire caliente y húmedo que es descargado, siendo la distribución interna del aire menos uniforme.

Para el IDEA 100 se eligió utilizar una torre de enfriamiento de tiro inducido, debido a que el tamaño es compacto, además de que son altamente eficientes. La torre tiene una base cuadrada de 2450 mm por lado y una altura aproximada de 3800 mm, cuenta con un ventilador en la parte superior y un tanque de almacenamiento del agua de enfriamiento para un volumen de 2800 litros.

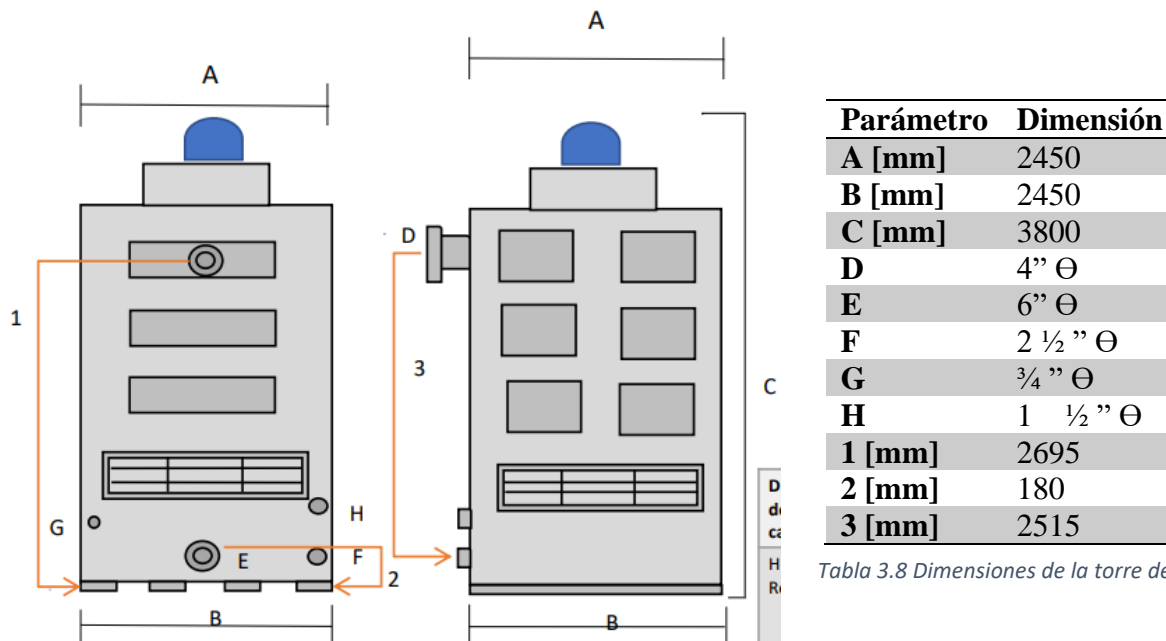


Tabla 3.8 Dimensiones de la torre de enfriamiento

Figura 3.16 Vista previa de la torre de enfriamiento.

También en este caso es relevante calcular la carga térmica que debe realizar la torre para así determinar cuál es la que se necesita para el ciclo y su capacidad, por lo tanto, se usa la misma ecuación (15) para determinarlo, pero en esta ocasión considerado el balance de masa y energía en el área del sistema del agua de enfriamiento, con su flujo másico y entalpías correspondientes:

$$Q_{AE} = 18.64 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] * \left(159.3 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] - 104.9 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] \right)$$

$$Q_{AE} = 1,014 \text{ kWt}$$

Como se puede observar del resultado anterior, este es prácticamente la misma carga térmica que el condensador debe disipar para hacer el intercambio de calor entre ambos fluidos, tanto el refrigerante como el agua de enfriamiento, pues dependen uno del otro.

3.5 Selección de tuberías, válvulas y bridas

3.5.1 Memoria de cálculo para la selección de tuberías

Como se mencionó en el capítulo anterior, en el punto 2.3.4, se determinó la metodología para hacer los cálculos necesarios para calcular los diámetros y cédulas correspondientes de las tuberías de cada segmento del ORC. Haciendo uso de los anexos 2.1-2.7 los cuales son fragmentos de las normas ASME correspondientes.

Para la selección de las tuberías se asignaron las ecuaciones (1), (2) y (3), las cuales determinan el diámetro requerido, el espesor mínimo y la presión máxima que soportaría la

tubería, tomando en cuenta aspectos como la densidad del fluido en cada tramo, la velocidad de éste, la cual se calcula por estimación, así como el material de las tuberías para usar los datos de esfuerzos correspondientes.

De acuerdo con el diagrama de flujo de procesos del sistema IDEA 100 (ver figura 3.17), existen 4 puntos termodinámicos principales que determinan todas las características del proceso de generación en el ORC, además de 2 estados en el sistema geotérmico y 3 en el sistema de agua de condensación.

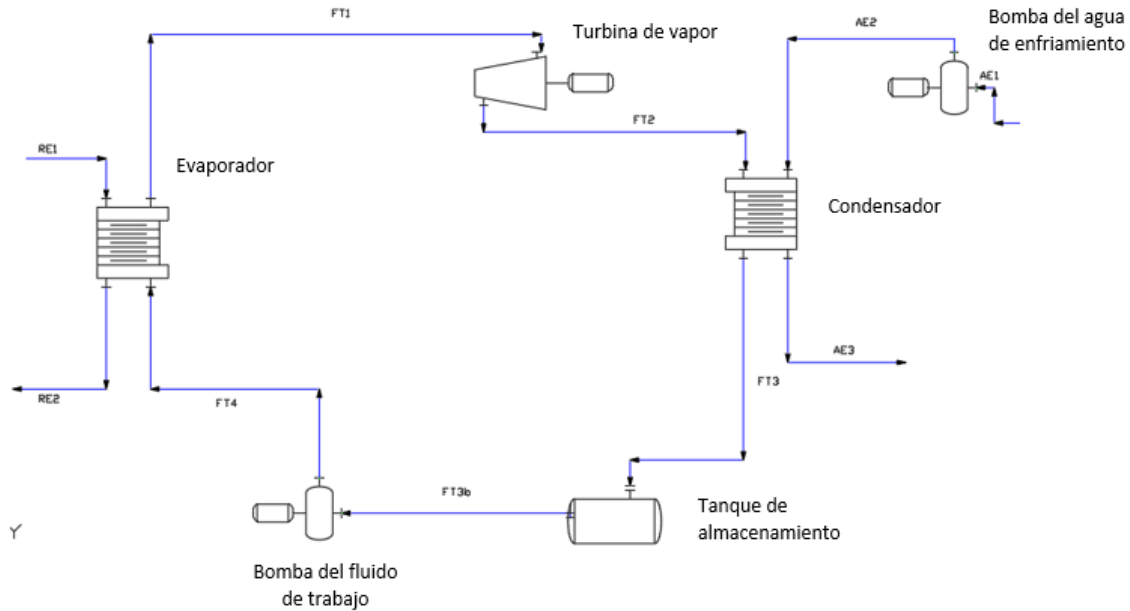


Figura 3.17 Diagrama de flujo del ORC IDEA 100

Los 4 puntos en el ORC se traducen en 5 líneas de tubería física, debido a que se añadió el tanque de almacenamiento entre el condensador y la bomba de circulación del fluido de trabajo, el cual se encuentra en el tramo determinado como FT3b. Termodinámicamente, el estado del fluido corresponde al mismo que en el punto FT3 al considerar estado estacionario en el tanque de almacenamiento del refrigerante.

Como al inicio de este capítulo ya se determinó el balance de masa y energía para el ciclo IDEA 100, las condiciones de operación del flujo de refrigerante para el dimensionamiento de tuberías de conducción están dadas. La siguiente tabla resume los datos que serán utilizados para los cálculos.

Propiedades	Segmentos de tubería									
	RE1	RE2	FT1	FT2	FT3	FT3b	FT4	AE1	AE2	AE3
Presión [bar]	8.5	8.0	20	3.6	3.1	3.1	20.5	1.0	2.0	1.5
Temperatura [°C]	170.0	119.0	143.0	89.0	47.0	47.0	48.0	25.0	25.0	38.0
Flujo Másico [kg/s]	5.694	5.694	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	20.938	20.938	20.938
Densidad [kg/m ³]	897.45	904.967	156.645	43.288	1207.59	1207.59	1204.976	997.0	997.0	993.0
Tipo de fluido	VSC	VSC	LS	VSC	VS	LSE	LSE	LSE	LSE	LSE

Tabla 3.9 Condiciones de operación de las líneas de tubería.

Entonces, considerando las ecuaciones correspondientes, así como los estados y datos de cada segmento, se realizan los cálculos para cada tramo del ORC. En la tabla siguiente se hacen los cálculos de uno de los tramos del ORC, con el objetivo de ejemplificar el proceso. Como material se seleccionó un acero ASTM A106, un acero al carbón, el cual suele utilizarse en este tipo de ciclos, por su costo y su compatibilidad con los fluidos de trabajo.

Segmento de tubería	RE1
Material	ASTM A106
Esfuerzo permisible	$SE = 17.1 [ksi] = 117.9 [MPa]$
Coefficiente de temperatura	$y = 0.4$
Tolerancia a corrosión	$A = 3.5 [mm]$
Velocidad de flujo	$v = 1.5 \left[\frac{m}{s} \right]$
Diámetro Requerido	$D_R = \sqrt{\frac{4 \times 5.694 \left[\frac{kg}{s} \right]}{\pi \times 897.45 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times 1.5 \left[\frac{m}{s} \right]}} = 0.07338 [m] = 73.38 [mm]$
Diámetro Nominal	$NPS = 3$
Diámetro Exterior	$D_O = 88.9 [mm]$
Presión de Diseño	$P_D = 2(8.5 [bar]) = 17.0 [bar] = 1.7 [MPa]$
Espesor Requerido	$t_m = \frac{1.7 [MPa] \times 88.9 [mm]}{2(117.9 [MPa] + 1.7 [MPa] \times 0.4)} + 3.5 [mm] = 4.13 [mm]$
Espesor Nominal Recom.	$t_{nom} = 7.62 [mm] - CED XS$
Presión Máx. de Trabajo	$P_{max} = \frac{2 \times 117.9 [MPa] \times (7.62 - 3.5) [mm]}{88.9 [mm] - 2 \times 0.4(7.62 - 3.5) [mm]} = 109.27 [bar]$
Diámetro Interior	$D_i = 88.9 [mm] - 2 \times 7.62 [mm] = 73.66 [mm]$
Velocidad real	$v_{real} = \frac{5.694 \left[\frac{kg}{s} \right]}{904.967 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times \frac{\pi}{4} (0.07366 [m])^2} = 1.48 \left[\frac{m}{s} \right]$

Tabla 3.10 Cálculos de tubería en segmento RE1

A continuación, se muestra un resumen de los resultados de los cálculos en el resto de las tuberías, tanto del ORC como de los sistemas SG y SC. Se observa que en los segmentos de tubería del ORC se utilizan y evalúan diámetros de tubería que no necesariamente corresponden con lo que la ecuación (1) sugiere. Esto se debe a que se decidió respetar los diámetros de conexión en los diferentes equipos; de tal modo, se evalúan las condiciones de flujo con dichos diámetros y se verifica que cumplan con parámetros

seguros de espesor y velocidad en el interior. Además, en las tuberías del SG se usa un espesor correspondiente a la cédula XS para cumplir los criterios de seguridad en la interconexión con las líneas de salmuera del campo geotérmico, debido a la diferencia de presión entre ambas líneas, así como al alto nivel de corrosión de la salmuera.

	SEGMENTOS DE TUBERÍA								
	RE1	RE2	FT1	FT2	FT3	FT4	AE1	AE2	AE3
Velocidad recomendada (m/s)	1.5	1.5	30	30	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Diámetro requerido (mm)	73.38	73.08	37.79	71.88	60.86	60.92	133.51	133.51	133.51
Diámetro NPS (pulg.)	3	3	4	8	4	2	6	6	6
Diámetro exterior (mm)	88.9	88.9	101.6	219.1	114.3	60.3	168.3	168.3	168.3
Presión de diseño (bar)	17	16	40	7.2	6.2	41	2	4	3
S E (MPa)	117.9	117.9	117.9	117.9	117.9	117.9	117.9	117.9	117.9
A (mm)	3.5	3.5	2	2	2	2	3.5	3.5	3.5
Coefficiente y	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Espesor requerido (mm)	4.14	4.09	3.70	2.67	2.30	3.03	3.64	3.78	3.71
Espesor nominal (mm)	7.62	7.62	3.96	2.77	2.77	3.18	3.96	3.96	3.96
CED	XS	XS	STD	STD	STD	STD	STD	STD	STD
Máx. Presión de Trabajo (bar)	109.27	109.27	45.48	8.28	15.88	46.14	6.44	6.44	6.44
Diámetro interior (mm)	73.66	73.66	93.68	213.56	108.76	53.94	160.38	160.38	160.38
Velocidad real (m/s)	1.49	1.48	4.89	3.4	0.46	1.97	1.03	1.03	1.04

Tabla 3.11 Resumen de resultados de cálculo de tuberías.

3.5.2 Memoria de cálculo para la selección de bridas

En el punto 2.4.2, del capítulo anterior, se propuso usar la metodología para determinar la clase de bridas adecuadas para el SRO, basándose en el estándar ASME B16.5, por medio de la ecuación (4).

Para hacer los cálculos correspondientes se deben evaluar todos los segmentos de tubería del sistema, nuevamente, tomando en cuenta los valores de temperatura y presión correspondientes a la tabla 3.9.

En la tabla siguiente se efectúan los cálculos de uno de los tramos del ORC, con el objetivo de ejemplificar el método. Como material se seleccionó un acero ASTM A105, el cual es un acero al carbón.

Segmento	FT1
Rating Clase de tubería	$P_r = 300$
Material de brida	ASTM A105
Temperatura de trabajo	$T = 143^\circ\text{C}$
Esfuerzo de cedencia a 38°C	$S_{y@38^\circ\text{C}} = 248 \text{ [MPa]}$
	$60\%(S_{y@38^\circ\text{C}}) = 148.8 \text{ [MPa]}$
Esfuerzo de cedencia a T	$S_{y@T} = 220.12 \text{ [MPa]}$
	$60\%(S_{y@T}) = 132.072 \text{ [MPa]}$
Esfuerzo último a la tracción a T	$S_{u@T} = 483 \text{ [MPa]}$
	$60\%(S_{y@T}) = 150.94 \text{ [MPa]}$
Esfuerzo seleccionado	$S_1 = 132.072 \text{ [MPa]}$

Presión de trabajo	$p_t = \frac{10 \times 132.072 [MPa]}{8750} \times 300 = 45.28 [bar]$
Topo de presión de clase 300 a T₁₀	$p_c = 50.468 [bar]$
$p_t \leq p_c$ OK	

Tabla 3.12 Evaluación de clase de brida en el segmento RE1.

A continuación, se muestra un resumen de los resultados de los cálculos en el resto de las líneas de tubería, tanto del SRO como de los sistemas SG y SC.

	SEGMENTOS DE TUBERÍA								
	RE1	RE2	FT1	FT2	FT3	FT4	AE1	AE2	AE3
Clase de brida	300	300	300	150	150	300	150	150	150
Material	ASTM A105								
Sy @ 38°C [MPa]	248	248	248	248	248	248	248	248	248
60% Sy @ 38°C [MPa]	148.8	148.8	148.8	148.8	148.8	148.8	148.8	148.8	148.8
Sy @ T [MPa]	216.6	223.96	220.12	228.88	243.8	243.2	248	248	237.4
60% Sy @ T [MPa]	129.96	134.38	132.072	137.33	146.28	145.92	148.8	148.8	142.4
Su @ T [MPa]	483	483	483	483	483	483	483	483	483
1.25 x 25% Su @T [MPa]	150.94	150.94	150.94	150.94	150.94	150.94	150.94	150.94	150.94
S1 [MPa]	129.96	134.38	132.072	137.33	146.28	145.92	148.8	148.8	142.44
Pt [bar]	44.55	46.07	45.28	18.05	19.23	50.03	19.56	19.56	18.72
Pc [bar]	49.62	51.04	50.468	18.09	19.625	51.7	20.0	20.0	19.99
¿ $p_t \leq p_c$?	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tabla 3.13 Evaluación de clase de bridas.

Con base en los resultados de la tabla anterior, se puede concluir que las clases de bridas seleccionadas son adecuadas para todos los sistemas, SC, SG y ORC, cumpliendo satisfactoriamente con lo que dicta el código ASME B16.5. Se sugiere que para el SG se utilicen bridas CL300, así como en los puntos del ORC donde se tienen las mayores presiones y temperaturas.

3.5.3 Memoria de cálculo para la selección de válvulas

La selección para la clase de válvulas se hace siguiendo el código ASME 16.34. El cual sigue la misma metodología que la ASME 16.5 hace para la selección de bridas, por lo que la ecuación (5) descrita en el punto 2.4.3 es equivalente a la ecuación (4).

De tal modo se ilustra la comprobación de la evaluación de la clase de válvulas seleccionadas en la tabla a continuación.

	SEGMENTOS DE TUBERÍA								
	RE1	RE2	FT1	FT2	FT3	FT4	AE1	AE2	AE3
Clase de válvula	300	300	300	150	150	300	150	150	150
Material	ASTM A216-WCB								
Pst [bar]	44.55	46.07	45.28	18.05	19.23	50.03	18.97	18.97	18.72
Pca [bar]	49.62	51.04	50.47	18.09	19.63	51.7	20.48	20.48	19.99
¿ $p_{st} > p_{ca}$?	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

¹⁰ Valor obtenido mediante la interpolación lineal.

Tabla 3.14 Evaluación de clase de válvulas.

En este caso se seleccionó un acero ASTM A216, del cual se pueden consultar sus características en el anexo 2.5. La metodología efectivamente arroja el mismo resultado que en el caso de las bridas, asignando una CL300 para los puntos de mayor presión y temperatura.

3.6 Instrumentación y Control

La medición y el control de procesos son fundamentales para generar los mejores resultados posibles en lo correspondiente a la utilización de recursos, máquinas, rendimiento, rentabilidad, protección medioambiental, así como para la seguridad de una planta.

La instrumentación industrial es el grupo de equipamientos y dispositivos que sirven a los ingenieros y técnicos para medir, convertir y registrar variables de un proceso y, luego, transmitirlos, evaluarlos y controlarlos con tales fines. En pocas palabras, el objetivo de instrumentar un ciclo es monitorear el proceso.

Los aparatos de medición y control de procesos suelen medir características físicas como: tensión, presión, fuerza, temperatura, flujo y nivel, velocidad, peso, humedad, punto de rocío, así como propiedades químicas como el pH y la conductividad eléctrica.

En cuanto al control, éste se encarga de manejar las funciones esenciales que se requieran para operar, tales como despliegues de pantalla, alarmas, regulaciones, interlocks de seguridad y control, así como funciones de monitoreo y conmutación

Actualmente existen productos complementares dedicados a la adquisición de datos y a la automatización para dejar los procesos de medición y control cada vez más rápidos y eficientes, a costos reducidos.

La instrumentación y control está relacionada con el área eléctrica del sistema, por lo que para elegir los instrumentos adecuados es necesario consultar y cumplir con los requisitos de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM). Se debieron considerar, además, las normas pertinentes a las siguientes organizaciones:

- American National Standard Institute (ANSI)
- Institute of Electrical Engineers (IEEE)
- National Electrical Manufacturers Association (NEMA)
- International Electrotechnical Commission (IEC)
- Underwriters Laboratories Inc. (UL)
- International Society of Automation (ISA)

En cuanto a las unidades de medición, estas se regirán por lo establecido en el sistema internacional de unidades (SI), de acuerdo con la NOM-008-SCFI-2002, excepto el diámetro nominal de las tuberías, el cual se expresa en pulgadas.

Todos los instrumentos serán calibrados y sus escalas serán graduadas sobre la siguiente base de unidades de medida.

Parámetros	Unidades
Temperatura	°C
Presión absoluta	bar
Presión manométrica	bar
Presión diferencial	bar
Presión de vacío	bar
Masa	g, kg
Longitud	mm, m, km
Velocidad	m/s, km/h
Potencia	kW
Posición y medición de nivel	0 – 100%, litros
Flujo de líquidos	M ³ /h, kg/s, l/h
Flujo de vapor	Kg/s, m ³ /h
Gas	(1.013 bar/273.15 k) Nm ³ /h
Voltaje	V, kV, mV
Tiempo	s, h, d

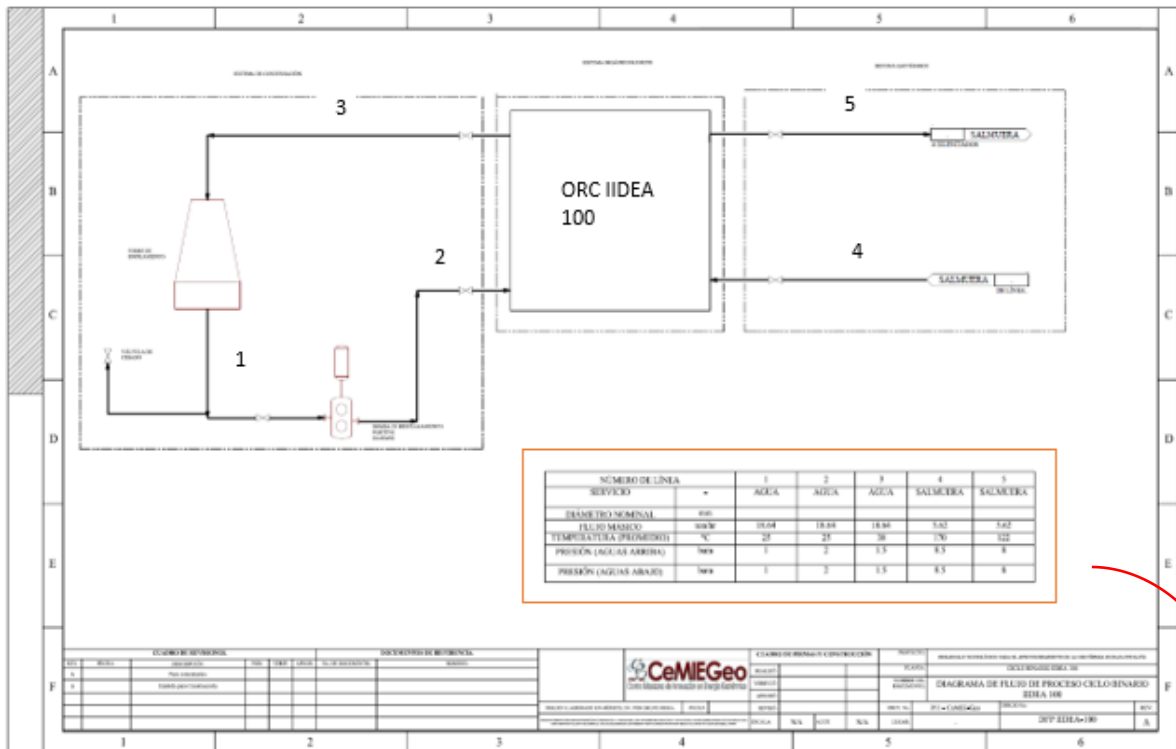
Tabla 3.15 Unidades de medición.

3.6.1 Diagramas de flujo de proceso

Un Diagrama de Flujo de Procesos (DFP) es un tipo de diagrama de flujo que ilustra las relaciones entre los principales componentes de una planta industrial. Es normalmente utilizado en ingeniería química y de procesos para indicar el flujo general de los procesos y equipos de las plantas.

Un DFP muestra la relación entre un equipo principal pero no muestra detalles menores, como especificaciones de tubería y designaciones. También se puede denominar diagrama de flujo de bloques.

El diagrama de flujo de proceso del IDEA 100 ilustra la manera en la que los distintos sistemas (SG, ORC y SC) se encuentran conectados, así como los equipos principales que los conforman. Como lo dice su nombre, ilustra la dirección en la que los flujos se mueven a lo largo de los sistemas para comprender mejor el proceso.



NÚMERO DE LÍNEA		1	2	3	4	5
SERVICIO	-	AGUA	AGUA	AGUA	SALMUERA	SALMUERA
DIÁMETRO NOMINAL	mm					
FLUJO MÁSSICO	ton/hr	18.64	18.64	18.64	5.62	5.62
TEMPERATURA (PROMEDIO)	°C	25	25	38	170	122
PRESIÓN (AGUAS ARRIBA)	bara	1	2	1.5	8.5	8
PRESIÓN (AGUAS ABAJO)	bara	1	2	1.5	8.5	8

Figura 3.18 Diagrama de flujo de proceso del IDEA 100

3.6.2 Diagramas de instrumentación y control

Los diagramas de instrumentación y control o DTI's son diagramas que contienen básicamente los equipos de proceso, las tuberías, los instrumentos y las estrategias de control del proceso. Este contiene especificaciones de tuberías y son fundamentales en la etapa de diseño de un proyecto de ingeniería.

En el caso de instalaciones de procesamiento, se trata de una representación gráfica de:

- Los detalles clave de las tuberías.
- Los esquemas de control y apagado.
- Los requisitos de seguridad y normativa.
- La información básica de arranque de operación.

Son documentos valiosos que hay que tener siempre al alcance, pues se usan para simplificar un proceso existente, reemplazar una pieza del sistema o guiar el diseño y la implementación de una nueva instalación.

Existen distintos símbolos para los equipos los cuales están regidos por normas. En el caso del IDEA 100 se realizaron dichos diagramas con ayuda del software Autocad Plant 3D, utilizando la simbología PIP.

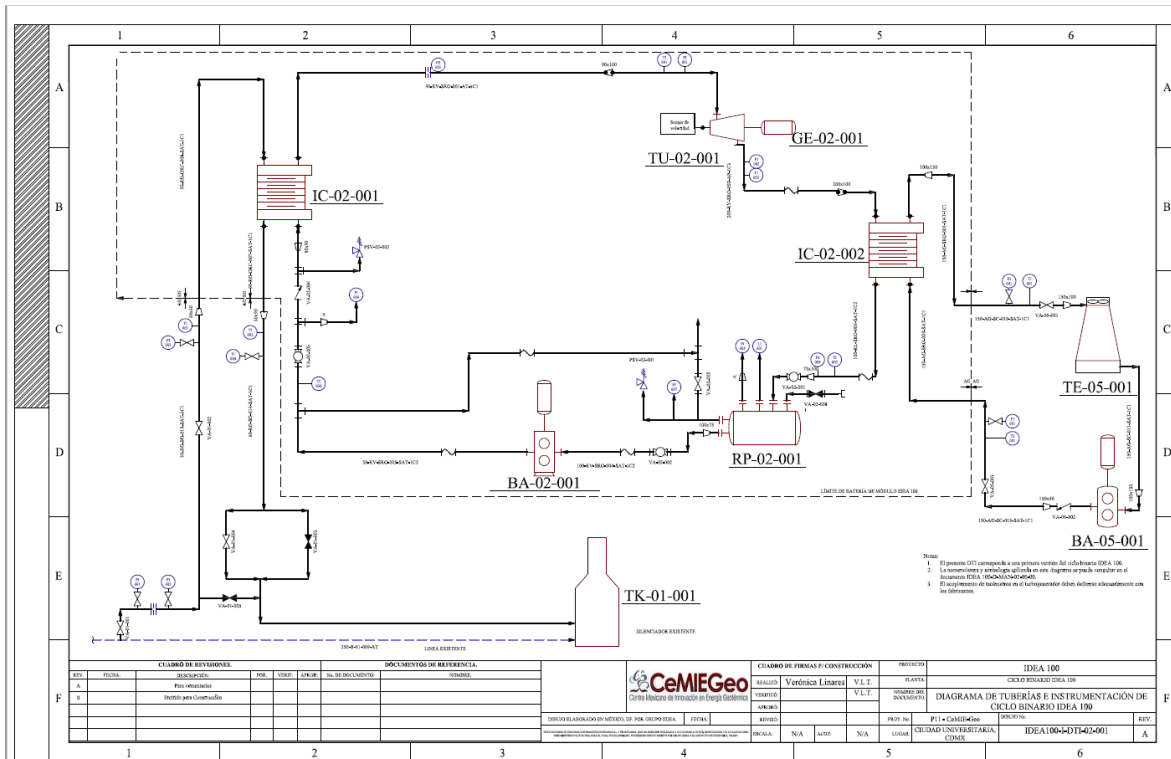


Figura 3.19 DTI del IDEA 100.

3.7 Lista de componentes y especificaciones técnicas.

En este punto se va a determinar la lista de componentes mecánicos necesarios para el ensamble del ciclo binario, tomando en cuenta el modelo en CAD completo haciendo la conexión de todos los equipos que involucran el sistema.

Pieza	Descripción	Cantidad
Válvula de globo	ASME B16.34, bridada, Clase 300, NPS 4	2
Válvula de globo	ASME B16.34, bridada, Clase 300, NPS 3	2
Válvula Check	ASME B16.34, bridada, Clase 150, NPS 4	1
Válvula de bola	ASME, NPS 4	1
Válvula de bola	NPS 1.5	1
Válvula de bola	NPS 3	1
Reductor concéntrico	4x3 Cédula 80	1

Reductor concéntrico	3x1.5 Cédula 80	1
Reductor excéntrico	8x4 Cédula 40	1
Codo 90°	LR 3inch, Cédula 40	2
Codo 90°	LR 1.5 inch, Cédula 40	3
Codo 90°	LR 4 inch, Cédula 40	3
Codo 180°	LR 4 inch, Cédula 40	2
Codo 180°	LR 3 inch, Cédula 80	2
Tee	LR 1.5 inch, Cédula 80	1
Tee	LR 4 inch, Cédula 80	1
Tee	LR 4 inch, Cédula 40	1
Brida	Clase 300, Slip on, NPS 1.5	4
Brida	Clase 150, Slip On, NPS 1.5	4
Brida	Clase 300. Slip On, NPS 3	10
Brida	Clase 300, Slip On, NPS 4	16
Brida	Clase 150, Slip On, NPS 4	4
Brida	Personalizada, Slip On, NPS 8	1
Tubería	Acero al carbón, 1.5 inch, Cédula 40	3.7[m]
Tubería	Acero al carbón, A106, 3 inch, Cédula 40	2.35 [m]
Tubería	Acero al carbón, A 106, 4 inch, Cédula 40	11.7 [m]
Tubería	Acero al carbón, A 106, 8 inch, Cédula 40	330 [mm]

Tabla 3.16 Lista de materiales para la instalación del IDEA 100.

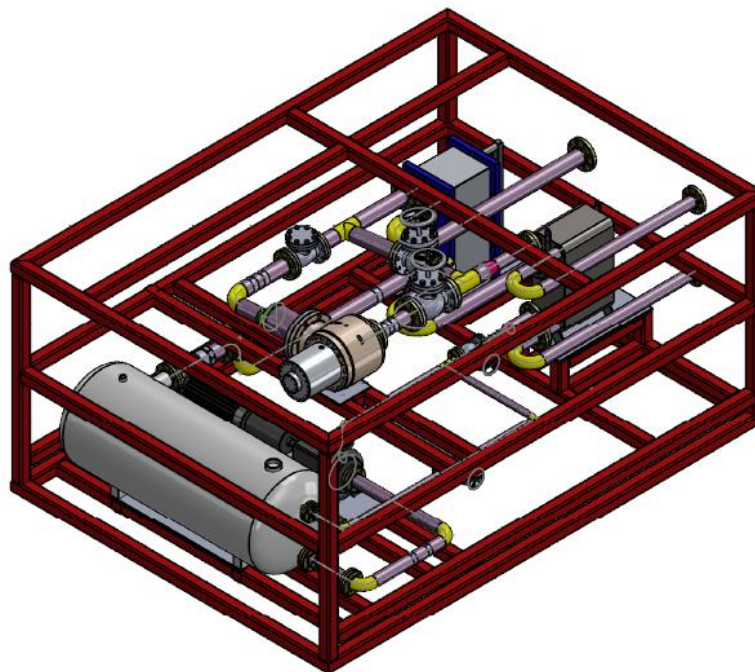


Figura 3.20 Diseño final del ORC.

Uno de los grandes retos para el diseño del IDEA 100 es que fuese un ciclo modular, es decir, que pudiese montarse y desmontarse con facilidad para realizar los mantenimientos correspondientes, y de igual manera se buscó que las dimensiones no fuesen excesivas.

Fue así como se llegó a la configuración anterior, y se decidió distribuir el ciclo de manera que la altura no fuese demasiada, para que de esta manera se pudiera operar el ciclo con más facilidad, sacrificando un poco el largo del módulo.

Se buscó distribuir de la manera más adecuada posible los equipos, para que las entradas y salidas de las líneas de tubería tuviesen la configuración más sencilla, dejando el espacio suficiente a sus accesorios y acoplamientos. Las dimensiones finales del módulo son 3 m x 4.4 m x 1.8 m.

3.8 Precomisionamiento y comisionamiento para la puesta en marcha de una planta ORC.

El precomisionamiento para una planta se considera como el conjunto de actividades que consideran ensayos estáticos e inspecciones, caracterizadas por la ausencia de energía y/o fluidos de proceso, esto con el fin de garantizar que las instalaciones y los sistemas se encuentran diseñados conforme a los documentos de ingeniería. Esta etapa se lleva a cabo cuando la planta ha sido instalada mecánicamente. Algunos de los ensayos que se consideran en esta etapa se enuncian a continuación: **[57]**

- Registro de limpieza de cañerías para fluidos.
- Montaje de equipos temporales para pruebas.
- Accionamiento de válvulas de control.
- Calibración y pruebas de instrumentos.
- Registro de pruebas de lazo de control.
- Registro de prueba de transformadores de poder y equipos eléctricos principales.
- Registro de pruebas de vibración de motores.
- Etc.

Es así, como definimos que el precomisionamiento comprende las actividades chequeos y pruebas que se llevan a cabo en una planta, antes de energizar y poner en funcionamiento los sistemas y subsistemas, para asegurar que cumpla con los requerimientos en los formatos de inspección.

En cuanto al comisionamiento, éste más bien se refiere al conjunto de actividades que consideran ensayos dinámicos e inspecciones, tomando en cuenta la inyección de energía eléctrica y/o fluidos de proceso a presión nominal, con las condiciones necesarias para asegurar la puesta en marcha del proyecto. Se lleva a cabo como siguiente paso del precomisionamiento y sirve como preparación para la planta. Algunos de los ensayos que se llevan a cabo en esta etapa son:

- Verificación de circuitos de control digitales y análogos.
- Pruebas funcionales de instrumentos y controles del sistema.

- Pruebas de rotación, vibración y arranque de equipos.
- Verificación de alineación de los equipos rotativos.
- Pruebas de válvulas.
- Etc.

3.8.1 Requerimientos de instalación (permisos).

El plan nacional de desarrollo 2019-2024 establece que la nueva política del estado mexicano impulsará el desarrollo sostenible mediante la incorporación de poblaciones y comunidades a la producción de energías renovables, mismas que serán fundamentales para suministrar de electricidad a las pequeñas comunidades aisladas que carecen de ella y que suman aproximadamente dos millones de habitantes. Aquí bien podrían entrar los ciclos binarios operados con geotermia como una alternativa de solución.

En este apartado se discutirán los aspectos legales para la generación de energía eléctrica, contemplada principalmente para el aprovechamiento de las energías renovables en los reglamentos correspondientes para la obtención de permisos para la generación eléctrica y los contratos de interconexión necesarios para particulares.

La Ley de Energía Geotérmica, publicada el 11 de agosto del 2014, tiene como objetivo regular el reconocimiento, la exploración y la explotación de recursos geotérmicos para el aprovechamiento de la energía térmica del subsuelo dentro de los límites del territorio nacional, con el fin de generar energía eléctrica o destinarla a usos diversos. En su Artículo 8 establece que sólo se necesita del registro en la CFE para el reconocimiento de la actividad geotérmica.

De igual manera, en el Artículo 17 de la Ley de la Industria Eléctrica, se establece que las Centrales Eléctricas con capacidad mayor o igual a 0.5 MW y las Centrales Eléctricas de cualquier tamaño representadas por un Generador en el Mercado Eléctrico Mayorista, requieren de un permiso otorgado por la CRE para generar energía eléctrica en el territorio nacional.

3.8.1.1 Pequeños Sistemas Eléctricos

En el capítulo VI de la Ley de la Industria Eléctrica se habla de los pequeños sistemas eléctricos, los cuales se utilizan para suministrar energía eléctrica al público en general y no se encuentran conectados de forma permanente a la Red Nacional de Transmisión.

En el artículo 66 se establece que la Secretaría debe autorizar los términos y convenios bajo los cuales los integrantes de la industria eléctrica colaborarán dentro de los pequeños sistemas eléctricos.

3.8.1.2 Generación Distribuida

En el Capítulo VII de la Ley mencionada anteriormente, se establece que la Generación Distribuida contará con acceso abierto y no indebidamente discriminatorio a la Redes Generales de Distribución, así como el acceso a mercados donde se pueda vender su producción.

Para este fin, el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional considerará la expansión y modernización de las Redes Generales de Distribución que se requieran para interconectar la Generación Distribuida; de igual forma, la CRE expedirá y aplicará la regulación necesaria en materia de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad y seguridad de la Generación Distribuida.

3.8.1.3 Permisos

Los permisos previstos en la Ley de la Industria Eléctrica serán otorgados por la CRE. Para su otorgamiento los interesados deberán presentar la solicitud correspondiente, la acreditación del pago de derechos o aprovechamientos en los términos que establezcan las disposiciones legales de la materia, la información relativa a su objeto social, capacidad legal, técnica y financiera, y la descripción del proyecto en los términos que establezca la CRE mediante disposiciones de carácter general.

3.8.1.4. Contrato de Interconexión Legado

La CRE está facultada para expedir modelos de contrato de interconexión de Centrales Eléctricas, conexión de Centros de Carga, compraventa por los Generadores Exentos y los demás que lo requieran.

En el Artículo 23 de la Ley de la Industria Eléctrica, se establece que las Centrales Eléctricas que destinen parte de su producción para fines de abasto asilado podrán ser interconectadas a la Red Nacional de Transmisión o a las Redes Generales de Distribución para la venta de excedentes y compra de faltantes que resulten de su operación en modalidad de Generador o Generador Exento¹¹, siempre y cuando se celebre el contrato de interconexión correspondiente y se sujeten a las Reglas del Mercado y demás disposiciones aplicables.

3.8.2 Normas de seguridad

Para la puesta en marcha de una planta, en este caso una planta de ciclo binario, se deben considerar algunas normas de seguridad específicas para que el personal se encuentre capacitado para la prevención de accidentes que pudieran suscitarse en el lugar. Por esta razón se deben establecer requisitos mínimos obligatorios de seguridad, así como los

¹¹ Propietario o poseedor de una o varias Centrales Eléctricas que no requieren ni cuentan con permiso para generar energía eléctrica en términos de la Ley de la Industria Eléctrica.

procedimientos de aplicación durante la instalación, inspección, puesta en marcha y pruebas operacionales de la planta.

Algunas de las normativas principales a las que se debe obedecer se mencionan a continuación:

- | | |
|-----------------------|---|
| NOM-002-STPS-2010 | Condiciones de seguridad para la prevención y protección contra incendios. |
| NOM-001-SEDE-2012 | Instalaciones Eléctricas (Utilización). |
| NOM-001-CRE/SCFI-2019 | Sistemas de medición de energía eléctrica-Medidores y transformadores de medida- Especificaciones metrológicas, métodos de prueba y procedimiento para la evaluación de la conformidad. |
| NOM-004-STPS-1999 | Sistemas de protección y dispositivos de seguridad en maquinaria, equipos y accesorios. |
| NOM-005-STPS-1998 | Condiciones de seguridad para el almacenamiento, transporte y manejo de sustancias inflamables y combustibles. |
| NOM-006-STPS-2014 | Seguridad e higiene para la estiba y desestiba de los materiales. |
| NOM-009-STPS-2011 | Seguridad e higiene para el almacenamiento, transporte y manejo de sustancias corrosivas, irritantes y tóxicas. |
| NOM-010-STPS-2014 | Seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, almacenen o manejen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral. |
| NOM-011-STPS-2001 | Seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genera ruido. |
| NOM-012-STPS-2012 | Seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, usen, manejen, almacenen o transporten fuentes generadoras de radiaciones ionizantes. |
| NOM-015-STPS-2001 | Exposición laboral de las condiciones térmicas elevadas o abatidas. |
| NOM-017-STPS-2008 | Protección personal para los trabajadores en el centro de trabajo. |

NOM-020-STPS-2011	Medicamentos, materiales de curación y personal que presta los primeros auxilios.
NOM-022-STPS-2008	Condiciones de seguridad donde la electricidad estática represente un riesgo.
NOM-023-STPS-2012	Elementos y dispositivos de seguridad de los equipos para izar en los centros de trabajo.
NOM-026-STPS-2008	Seguridad-Colores y su aplicación.
NOM-027-STPS-2008	Señales y avisos de seguridad e higiene.
NOM-028-STPS-2012	Seguridad-código de colores para identificación de fluidos conducidos en tuberías.
NOM-100-STPS-1994	Seguridad-extintores contra incendios a base de polvo químico seco con presión contenida.
NOM-108-STPS-2000	Prevención técnica de accidentes en máquinas y equipos, diseño o adaptación de los sistemas y dispositivos de producción, riesgo en función de los movimientos mecánicos
NOM-113-STPS-1994	Calzado de protección.
NOM-115-STPS-2009	Cascos de protección-especificaciones, métodos de prueba y clasificación.

De igual manera, algunas de las especificaciones generales para la seguridad industrial respecto al personal que vaya a operar en la planta se mencionan enseguida.

- Todo el personal que labore en el proyecto deberá utilizar el equipo de protección personal de acuerdo con las instrucciones de uso y mantenimiento proporcionadas por el grupo.
- Todo el personal que labore deberá usar el cabello corto o recogido, no portar cadenas, anillos, pulseras, mangas sueltas u otros objetos que pudieran ser factor de riesgo durante las operaciones.
- El personal deberá reportar al encargado del proyecto cualquier anomalía de la maquinaria y equipo que pueda implicar riesgo.
- Se impedirá el acceso a la zona de riesgo a los trabajadores no autorizados.
- Se realizarán las actividades de soldadura y corte solamente si el trabajador cuenta con la capacitación y, en su caso, con la autorización correspondiente.
- Todo el personal que labore en este proyecto deberá utilizar calzado de protección con suela conductiva y sin partes mecánicas

3.9 Fuentes Consultadas

- [55] Cengel, Y. (2012). *Termodinámica*. New York: McGraw-Hill, pág 570.
- [56] Marcelino, L. (2022). *Evaluación termoeconómica de intercambiadores de calor para sistemas ORC operados con baja y media entalpia*. Ciudad de México.
- [57] *Serintek*. (01 de 03 de 2022). Obtenido de <https://www.serintek.cl/precomisionamiento-comisionamiento-y-puesta-en-marcha/>
- [58] SEGOB. (2014). *Reglamento de la Ley de la Industria Eléctrica*. Ciudad de México.

Capítulo IV

Análisis económico y de mercado de una planta ORC.

Este capítulo es de suma importancia, pues se realiza un estudio económico desglosando los gastos de inversión, instalación y mantenimiento que involucraría la construcción y puesta en marcha del ciclo para así poder determinar si se trata de una propuesta competitiva para el mercado, suponiendo que en un futuro pudiese distribuirse como una nueva propuesta mexicana. Se discutirá acerca de la competencia que existe actualmente en el mundo, y se hace la comparativa con el escaso desarrollo tecnológico de este tipo de ciclos tanto en México, como en América Latina.

Se analizan de igual forma otros posibles campos de aplicación para los módulos ORC, no solo para ser operados con geotermia, sino también el posible aprovechamiento para remanentes energéticos en distintas industrias y el impacto que esto generaría para la industria que decidiera adoptarlos como una manera a pequeña escala de cogeneración.

Finalmente, se hace una comparativa de los ciclos binarios contra otras formas de generación limpias y se analizan las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

4.1 Desglose de gastos

El primer paso para hacer un análisis de costo beneficio de un proyecto es determinar la cantidad de dinero que se va a invertir en un inicio. En el caso de una planta ORC se deben considerar los costos de los equipos que conformarán el ciclo como principal costo de inversión.

Teniendo esto en mente, se identificaron en el mercado los equipos seleccionados para operar en el ciclo. El total se expresa en pesos mexicanos y en dólares, pues la mayoría de los proyectos de inversión se evalúan en esta moneda.

Clave	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Total
Turbina	pza	1	\$2,551,077.81	\$2,551,077.81
Evaporador	pza	1	\$409,685.66	\$409,685.66
Condensador	pza	1	\$263,967.39	\$263,967.39
Bomba para FT	pza	1	\$457,385.00	\$457,385.00
Bomba para AE	pza	1	\$20,549.00	\$20,549.00
Torre de enfriamiento	pza	1	\$395,265.00	\$395,265.00
Tanque Base	pza	1	\$23,699.00	\$23,699.00
Tanque adecuaciones			\$8,000.00	\$8,000.00
			Suma	\$4,129,628.86
			IVA (16%)	\$660,740.62
			TOTAL pesos	\$4,790,369.48
			TOTAL en USD	\$231,867.99*

Tabla 4.1 Desglose del costo de los equipos. *Se considera el valor del dólar de \$20.66 pesos mexicanos, valor al día 02/03/2022

A pesar de que los costos de los equipos representan una gran parte de la inversión inicial para un proyecto de Ciclo Binario Orgánico, no se consideran en el análisis económico como los únicos, y es necesario tomar en cuenta todos los costos y capital a invertir que representan una puesta en marcha de un proyecto de estas dimensiones.

4.1.1 Capital total invertido

Naturalmente todos los proyectos necesitan ser rentables. Es por esto que los costos al diseñar una planta son fundamentales. Existen otros capitales de inversión que deben incluirse en el análisis.

Para poder calcular el costo total de inversión, es necesario considerar los siguientes aspectos [59]:

$$CTI = CFI + CPM + CL + CFC \quad (16)$$

Donde:

CTI – capital total invertido

CFI – capital fijo invertido

CPM – Costos de puesta en marcha

CL – Costos de licencia

CFC – Costos financieros de construcción.

4.1.1.1. Capital fijo invertido

Este se centra en los costos de la maquinaria, equipos y el material estructural para la instalación de la planta. Esta inversión se puede dividir en dos partes, lo correspondiente a los gastos directos, los cuales involucran principalmente los objetos y materiales físicos para la instalación y los costos indirectos que consideran las actividades y el equipo necesario para la instalación.

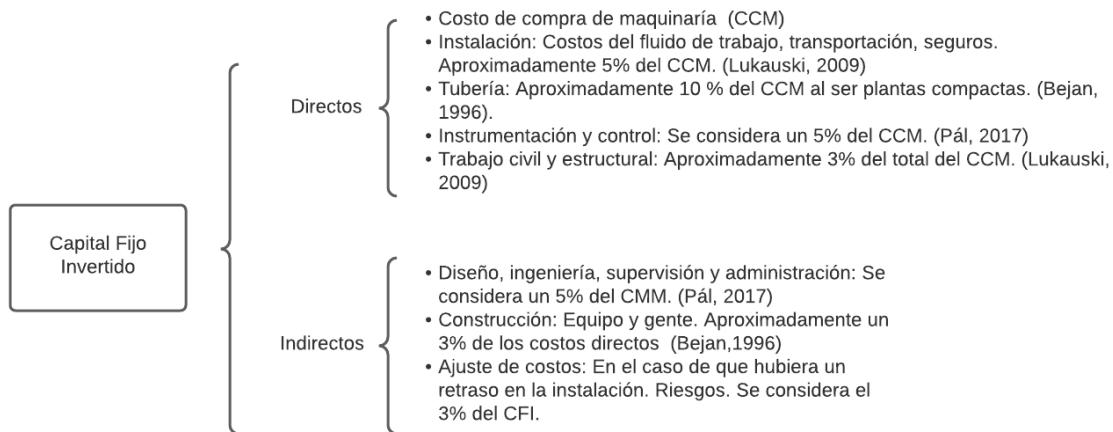


Figura 4.1 Capital Fijo Invertido (CFI) de un proyecto de ORC. (Lukauski, 2009)[60], (Bejan, Tsatsaronis, & Moran, 1996)[61], (Pál, 2017) [62]

En el diagrama anterior se resumen los costos de capital fijo invertido directos e indirectos. Cada uno de estos costos está asociado a un porcentaje, los cuáles hacen una estimación de la cantidad de dinero que se le debe aportar a dichos materiales o actividades. Por ejemplo, en el caso de la tubería para la instalación del Sistema completo, se estima que se debe considerar como un 10% del costo de compra de la maquinaria (CCM) según Bejan, Tsatsaronis, & Moran (1996), o para el diseño, la ingeniería y supervisión de la construcción se estima un 5% del CMM de acuerdo con Pál (2017).

De esta manera, para cada uno de los costos extras asociados a la instalación de la planta, se estima la inversión necesaria.

4.1.1.2 Costos de Puesta en Marcha.

En esta sección se considera los costos de lo que sea necesario para hacer funcionar la planta, donde generalmente se evalúa el costo del combustible. En este caso al ser un ORC se considera como combustible el fluido de trabajo total necesario para hacer operar la planta, así como el agua geotérmica caliente, que representa otro insumo importante.

En cuanto al fluido de trabajo, se consideró que para el funcionamiento del ORC es necesario contar con 900 kg de refrigerante R1233zd, el cual tiene un costo total en el mercado de \$479,775.37.

El agua geotérmica es un factor de costo que se debe considerar de igual forma, pues al hacer uso de un pozo geotérmico que no sea propio se debe considerar la renta del mismo. Según Jaimovich (2007) [63] el costo por tonelada de agua caliente para altas temperaturas (>150°C) varía entre 20-40 centavos de dólar americano.

De igual manera, aquí podría considerarse el costo del agua que se va a utilizar para el enfriamiento del ORC. Estos costos son agravados con un cargo de m³, que de acuerdo con el capítulo VII, artículo 223 de la Ley Federal de Derechos vigente. Los valores de las

cuotas aprobadas para este año de los costos del agua para generación geotérmica es de \$6.20 por m³.

4.1.1.3 Costos de licencia.

Se refiere a los costos de interconexión con la red eléctrica. Para el caso de México, es necesario tramitar un permiso para Interconexión a pequeñas y medianas potencias, el cual abarca potencias menores a 500 kW [64]. Este trámite es completamente gratuito, por lo que se descarta este costo del análisis.

4.1.1.4 Costos Financieros de Construcción.

Este apartado consta del costo del tiempo de la instalación de la planta. En este caso al tratarse de un ORC modular, el sistema será fácil de instalar, pues se cuenta previamente con el lugar de instalación y se tiene un plan de lo que será la conexión con el campo geotérmico a sus pozos correspondientes, por lo que para propósitos de este estudio, se rechaza este factor.

En este apartado entrarían los costos de la perforación de pozos, los cuales cabe mencionar que representan una de las inversiones más significativas para un proyecto geotérmico. La perforación de pozos de exploración en áreas verdes se dice que tiene un índice de éxito del orden de 50 a 60%, y la exploración de pozos nuevos del 25% [65].

Se estima que el costo de perforar un pozo geotérmico va de los 15 a los 40 dólares por pie de profundidad. Los pozos geotérmicos tienen generalmente seis pulgadas de diámetro, y su profundidad puede ir desde los 200 hasta los 3500 metros, aproximadamente.

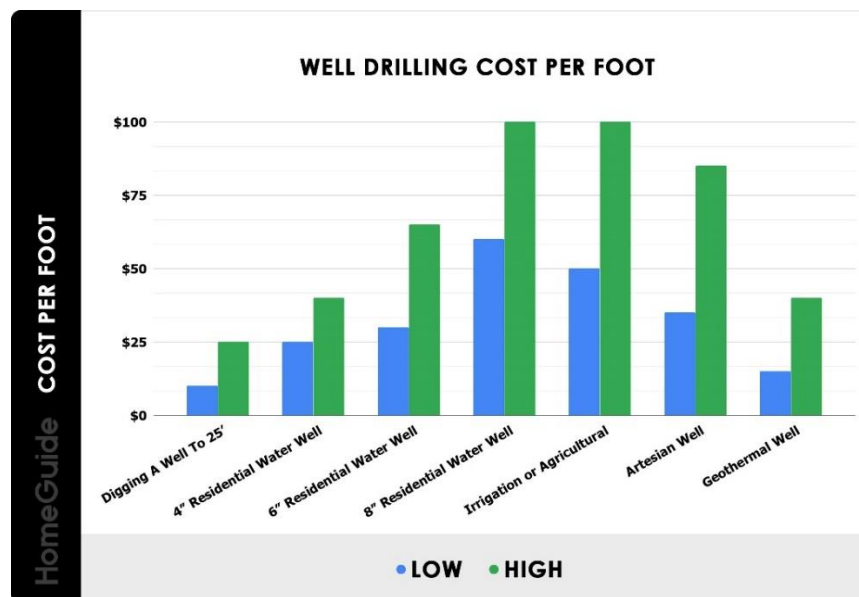


Figura 4.2 Costo de excavación de pozos para distintos fines. Imagen extraída de <https://homeguide.com/costs/well-drilling-cost> consultado el 23/05/22

4.1.2 Costos de mantenimiento y operación O&M

Los costos de mantenimiento y operación son gastos fijos que deben considerarse cada año que la planta se encuentre en operación. Sanyal (2004) [66], explica un análisis de sensibilidad de costos para un proyecto geotérmico. De acuerdo con datos recabados y presentados por Entingh & Mc Veigh (2003) [67], se estima una relación para calcular los costos de O&M que representaría la instalación de una planta de cualquier capacidad. En este caso el costo C_{OM} , se expresa en centavos de dólar por kW h [¢USD/kWh], respecto a la capacidad de la planta instalada, P_N , en [MW].

$$C_{OM} = 2e^{-0.0025(PN-5)} \quad (14)$$

Entonces, con la expresión anterior es posible calcular un aproximado de los costos de O&M, considerando la capacidad de la planta, que en este caso son 100 kW.

4.2 Ingeniería económica de una planta ORC

La ingeniería económica se define como el conjunto de saberes formado por varias disciplinas cuyo objetivo primordial es la evaluación de alternativas de inversión con el objeto de tomar la mejor decisión. Este conjunto de disciplinas complementa a la ingeniería para crear proyectos que satisfagan las necesidades humanas con una perspectiva económica.

Es así, como se realizará la evaluación de nuestro proyecto de inversión, esto con el objetivo de determinar los distintos escenarios donde éste sería rentable y aquellos donde no.

Para dicho análisis se van a tomar en cuenta factores como el valor del dinero en el tiempo, para evaluar la transformación de la planta a lo largo de su vida útil y el cálculo de la potencia eléctrica que producirá la planta considerando sus factores de planta y usos propios, para de esta manera poder calcular un costo unitario de generación. Todo lo antes descrito se enuncia mejor en los puntos siguientes.

4.2.1 El valor del dinero en el tiempo

La metodología para evaluar la factibilidad económica de la construcción y puesta en marcha del Ciclo Binario IDEA 100 fue la utilizada en (COPAR, 2015) [68]. La ingeniería económica utiliza conceptos y técnicas matemáticas para analizar, comparar y evaluar financieramente diferentes alternativas y proyectos, tomando como base los costos de cada uno. Es una herramienta que nos permite determinar si una alternativa es económicamente posible.

Para que el análisis financiero sea correcto y para estar seguros de que un proyecto es rentable, se debe considerar como primer punto el valor del dinero en el tiempo. Una cierta cantidad de dinero tiene diferente valor en diferentes puntos del tiempo. Por lo que es necesario evaluar los flujos de efectivo a lo largo de la vida de la planta en este caso (ingresos y gastos). Estos costos que suelen variar pueden estar relacionados al costo de la electricidad, por ejemplo, o de combustibles o en este caso al fluido de trabajo. Para un correcto análisis es indispensable utilizar el valor presente de una suma única de dinero, para de esta manera calcular la cantidad de dinero invertido en una planta a lo largo de su vida, considerando el valor presente del dinero.

La siguiente expresión define lo descrito anteriormente.

$$P = F \frac{1}{(1 + i)^n} \quad (15)$$

Donde P es el valor presente de dinero, F el valor futuro y n el número de años.

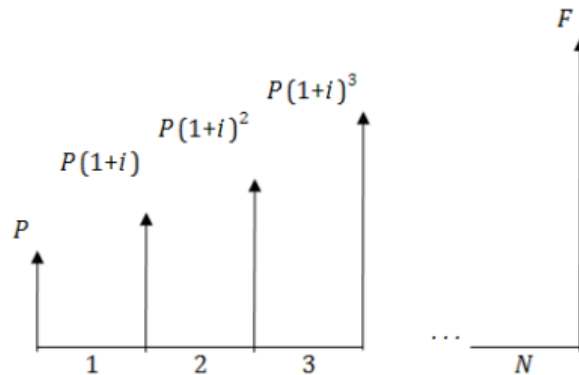


Figura 4.3 Diagrama del flujo de dinero para el valor presente y futuro.

4.2.2 Costo Unitario de Generación

El costo unitario de generación es el costo por producir un kWh, se trata de un costo nivelado y está compuesto por tres partes:

- Costo de inversión
- Costo del combustible -> No se considera en esta planta, pues no necesita de una inversión de combustible anualmente. En el caso de que el campo no fuese propio, se puede considerar el costo de la salmuera para la operación del ciclo.
- Costo de operación y mantenimiento (O&M)

Para calcular el costo unitario de inversión es necesario primero calcular la energía neta generada cada año de nuestra planta. En este cálculo es necesario considerar aspectos como el CTI, los usos propios, y el factor de planta. Es así como la energía generada se calcula de la siguiente manera.

$$EN = CTI(1 - UP)(8760)(FP) \quad (16)$$

Donde:

CTI: Costo total de inversión.

UP: Usos propios, expresado de manera porcentual.

FP: Factor de planta, expresado de manera porcentual.

De la misma manera, para calcular el costo unitario de inversión, se divide el CTI entre el total del valor presente de la energía generada a lo largo de los años.

$$CU_I = \frac{CTI}{VPEG} \left[\frac{USD}{MWh} \right] \quad (17)$$

Donde:

VPEG: Valor Presente de la Energía Generada.

El costo unitario de O&M se obtiene al dividir el costo en valor presente de O&M entre el valor presente de la energía generada.

$$CU_{OM} = \frac{VPOM}{VPEG} \left[\frac{USD}{MWh} \right] \quad (18)$$

La suma de $CU_I + CU_{OM}$ da como resultado el costo unitario de generación de nuestra planta.

4.2.3 Rentabilidad Financiera

Una vez que se han estimado los costos de inversión, operación, mantenimientos y los ingresos esperados, se plantea la rentabilidad económica de la planta, calculando el Valor Actual Neto (VAN), el cual determina a valor presente, el dinero que una inversión generará en el futuro. Una vez calculado se estima, de igual manera, la Tasa Interna de Retorno (TIR), la cual es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. Es decir, el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá el proyecto.

El VAN es la suma de todas los gastos e ingresos a través de la vida del proyecto. O bien, el valor presente de las entradas menos el valor presente de las salidas de dinero.

$$VAN = -C_0 \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (19)$$

Donde C_t es el flujo de efectivo neto durante el periodo t , C_0 = Costos totales de inversión, r = Tasa de descuento, t = número de periodo.

El TIR se refiere a esa tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Se calcula considerando los mismos factores que en el cálculo del VAN.

$$VAN = -C_0 \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (20)$$

Cuando se obtiene un VAN mayor a cero, nos indica que el proyecto es rentable pues no habrá pérdida de dinero en la inversión. El TIR nos indica en qué porcentaje el proyecto es rentable. El TIR debe ser mayor que la tasa de descuento del proyecto. Para este proyecto en particular se consideró una tasa de descuento del 10%.

4.2.4 Resultados del análisis y discusión

Existen algunas consideraciones que se tomaron en cuenta para el análisis económico completo. Uno de los más importantes es el costo de la energía eléctrica en donde se instalará la planta considerando las tarifas de la región.

La planta, como ya se había mencionado, será instalada en Nayarit, México. Por lo que se buscaron las tarifas eléctricas asignadas a esta región, la cual corresponde a la Región Sur del país. Tomando en cuenta un factor de planta del 85%, equivalente a que nuestra planta estará generando energía 7446 horas al año. Se tomó como referencia el costo promedio de la energía para la industria.

Haciendo la investigación correspondiente, se obtuvo que la energía en el año presente para el sector industrial tiene un costo de aproximado \$1.30 pesos mexicanos. Con estos precios es posible calcular la ganancia que se tendría anualmente por operar las 7446 horas produciendo los 100 kWe.

En el análisis presente se planteó un escenario donde los costos de O&M se estimaron con la relación de Sanyal (2004), ec (7). Se considera un factor de 3% de inflación anual. Una tasa de descuento de 6.5%. Así como una reinversión del 40% del CTI a los 10 años de operación para tener en cuenta algunos inconvenientes que se pudieran presentar, como el reemplazo de algún equipo. La vida útil de la planta de ORC se estimó de 25 años.

En el anexo 4.1 se puede observar una captura del Excel con balance económico completo descrito a continuación.

Tamaño 100 kW	
Capital invertido USD\$/kW	\$3,313.04
Capital total invertido MXN\$	\$6,581,784
Costo nivelado de generación USD\$/kWh	\$0.07
Costo nivelado de generación en pesos mexicanos. \$/kWh	\$1.51
Tiempo de recuperación	8 años
TIR	13.66 %

Tabla 4.2 Resultados del análisis económico para el ciclo binario IDEA de 100kW.

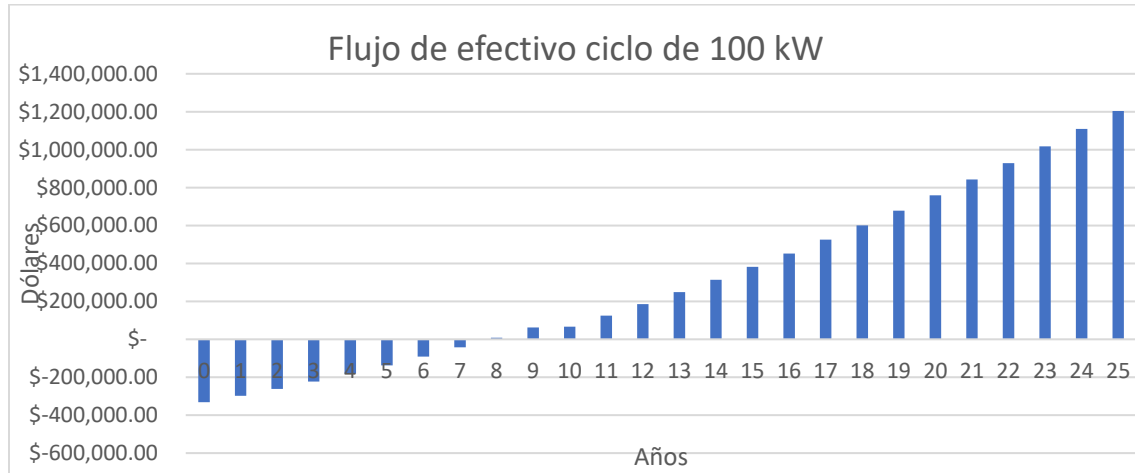


Figura 4.4 Diagrama de flujo del dinero del IDEA 100.

En la figura 4.4 se observa que el ciclo de 100 tiene un tiempo de retorno de inversión de 8 años, así como una Tasa Interna de Retorno del 13.65%, lo que nos indica que se trata de un proyecto rentable. Es bien sabido que los ciclos binarios tienen una baja eficiencia, lo que se refleja en sus largos tiempos de retorno y los justifica.

En el diagrama de flujo de efectivo se puede apreciar que, a los 25 años desde la instalación de la planta cuando ésta cumpla su vida útil, se va a obtener una ganancia neta de \$872,734.38 USD, contra la inversión inicial de \$331,304 USD, lo que se traduce en un aumento del capital invertido del 163%.

Hay que recordar que el presente proyecto se encuentra a un nivel prototipo, por lo que, al comercializarse masivamente y fabricarse en serie, habría una reducción significativa en los costos de inversión, lo cual convertiría el módulo ORC del IDEA 100 en una opción más competitiva frente al mercado de las energías limpias.

4.3 Análisis de la viabilidad económica de sistemas ORC

En este apartado se va a evaluar el mercado nacional e internacional de los ORC, con el objetivo de comparar nuestro módulo y ver cómo es que se podría introducir en el mercado para que sea percibida como una propuesta competitiva.

4.3.1 Mercado internacional de los ORC

El primer paso para hacer un análisis de mercado es identificar a la competencia, la cual está representada por ciclos binarios que comparten características similares a la tecnología desarrollada en grupo IIDEA.

De acuerdo con Macchi & Astolfi (2017) [69] existen distintas compañías en el mundo que se encargan de manufacturar ORC. Entre las más significativas se encuentran las siguientes.

Compañía	Origen	Capacidades	Aplicaciones
Ormat	E.U.A.	250 kW a 330 MW	Geotermia, Solar, Recuperación de calor
Turboden	Italia	200 kW a 2 MW	Biomasa, geotermia, calor residual, solar
ElectraTherm	E.U.A.	75 kW a 150 kW En desarrollo 250kW	Geotermia, biomasa, calor residual
Exergy	Italia	100 kW a 50 MW+	Geotermia, solar, biomasa, calor residual
ENOGIA	Francia	De 10 kW a 180 kW	Geotermia, recuperación de calor
Calnetix	E.U.A.	Hasta 125 kW	Calor residual
Triogen Company	Países Bajos	50 kW a 170 kW	Biomasa, calor residual
Rank	España	1 kW a 280 kW	Geotermia, solar, calor residual, biomasa
Orcan	Alemania	500 kW a 2 MW	Calor residual, marina, biogas, generación de energía
Infinity Turbine	E.U.A.	10kW a 400 kW	

Tabla 4.3 Compañías mundiales vendedoras de módulos ORC.

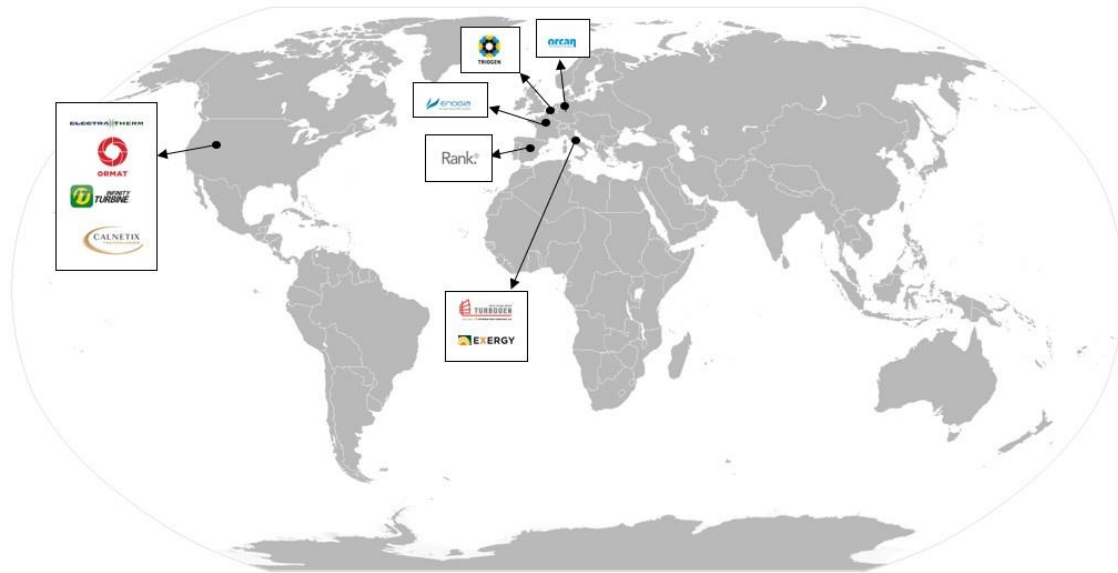


Figura 4.5 Mapa ilustrativo de las principales industrias de ORC a nivel mundial.

Existen más empresas fabricantes de ORC, sin embargo, estas son las más relevantes en cuanto impacto en el mercado, así como, en la similitud de sus productos con el nuestro.

Ormat es el líder en el mercado de los ORC, con más de 1.1 GW instalados en más de 75 países. Esta empresa se caracteriza por instalar plantas de gran capacidad y se especializa en la geotermia y en el calor residual. Sin embargo, en cuanto a los ORC de pequeña capacidad, uno de los competidores más grandes es *ENOGIA* con aproximadamente 75 módulos instalados de pequeña capacidad a nivel mundial, con una mayor concentración en Europa, los cuales están enfocados en mayor cantidad al aprovechamiento de remanentes energéticos. Incluso existen dos casos de existencia de módulos ORC en México. El primero llamado “San Nicolás U” el cual se construyó en 2016 para operar con recuperación de calor de un motor de biogas, y el segundo es un ORC de la marca CALNETIX de 125 kW que opera en Celaya GAMESA, el cual trabaja con gases de combustión que provienen de 4 Microturbinas Capstone.



Figura 4.6 Mapa mundial de la instalación de módulos ORC de la empresa ENOGIA. Extraído de su página web. (ENOGIA, 22)

De igual manera, es importante mencionar que E.U.A. cuenta con cuatro grandes proveedores de ORC, lo que lo convierte en uno de los mayores competidores a vencer, debido al número de empresas que se dedican a esto, su relevancia, y la cercanía con el país.

4.3.2 Mercado nacional de los ORC

En cuanto al mercado en México de los ciclos binarios, éste aún no se implementa como tal en el país. Actualmente solo existe registro de un proyecto de ORC con capacidad de producción de 1kW, propiedad de la empresa RAYPP S.A de C.V. con nombre comercial *Energía Amigable*. Dicho proyecto participó para el fondo PEI Proinnova en el año 2013. Esta empresa se vinculó con CIATEQ y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí para poder desarrollar el prototipo del ciclo con una potencia eléctrica menor a 30 kW y desarrollar un expansor que se acople a él. No se tiene registro de que el sistema se encuentre en el mercado o se piense comercializar en un tiempo cercano.

Dicho lo anterior, es importante recalcar la relevancia que los ciclos binarios tendrían en nuestro país, ya que representan una oportunidad de desarrollo tecnológico, que podría ser utilizado fácilmente para la geotermia o para aprovechar los remanentes energéticos de distintas industrias en el país, lo que beneficiaría en cuanto al impacto ambiental que la instalación de ellos representaría, así como económicamente en el ahorro de energía al contar con generación eléctrica propia.

4.3.3 Costos de los ORC

La búsqueda de referencias de precios en el mercado permite identificar que existe una relación directa entre el monto de la inversión y la capacidad de producción de energía al sistema.

De acuerdo con Tocci, Pal, Pesmazoglou, & Franchetti (2017) [70] hacer un ORC a pequeña escala sigue representando un reto pues sigue siendo una tecnología costosa,

aunque con mucho potencial, sin embargo, se estimó un costo competitivo para los ORC de pequeña escala, haciendo una comparación con las tecnologías disponibles actualmente en el mercado de producción eléctrica. La siguiente gráfica muestra el costo específico de plantas de generación instaladas basadas en el viento, sistemas fotovoltaicos, motores de combustión interna (ICE), turbinas de gas y tecnologías hidroeléctricas.

La línea de tendencia representa el costo promedio de todas las tecnologías para una capacidad específica. Entonces, para considerar que el ORC es competitivo, el costo de éste debe fijarse por debajo de dicha línea.

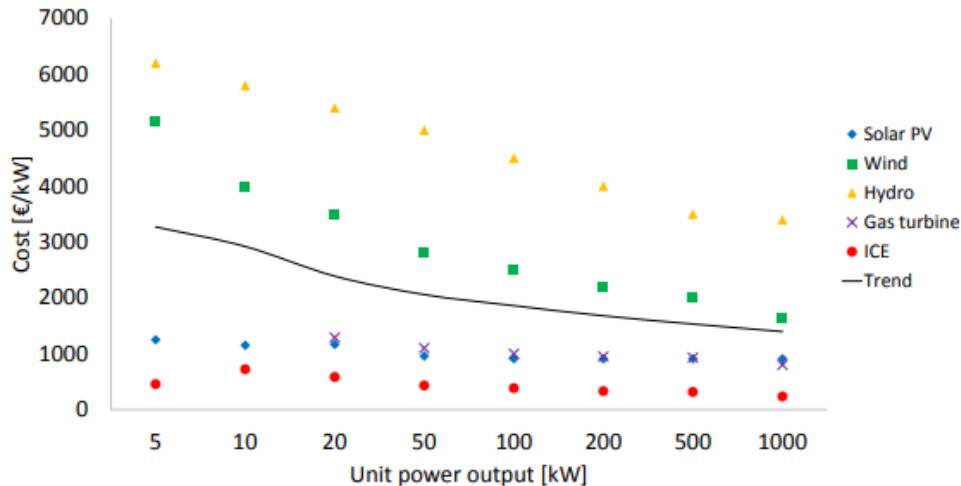


Figura 4.7 Costos de inversión ideal en función de la capacidad instalada. (Tocci, Pal, Pasmazoglou & Franchetti, 2017)

Tomando en cuenta dicha estimación, se recomienda que para que el módulo de 100 kW sea rentable, el costo de inversión debería ser menor a \$2,265.00 USD/kW. Recordemos que nuestro proyecto tuvo un costo de inversión aproximado de \$3,313.00 USD/kW, lo que lo sitúa un 46% por arriba del costo ideal.

Este análisis es comparando el costo de las distintas tecnologías limpias que hay actualmente en el mercado, sin embargo, hay que tomar también como referencia los costos que las empresas comercializadoras de ORC ofrecen al mercado.

De acuerdo con lo que se puede observar en sus páginas web, los fabricantes presentan su tecnología con capacidades para cuatro aplicaciones principales.

- Biomasa
- Solar
- Geotermia
- Calor Residual

Lo anterior indica que los sistemas tienen capacidad de adaptación a distintos sectores, es decir, que ofrecen la modalidad de instalación de plantas a la medida, o sistemas modulares estandarizados, tal como nuestro caso.

De acuerdo con Song, Song, & Gu (2015) [71] la gráfica inferior retrata los costos de los módulos ORC en euros por kW de acuerdo con la potencia que entregan. En dicha gráfica se puede determinar que el costo promedio de un ORC de 100 kW de potencia es de aproximadamente 3,300 euros por kW, es decir, \$6,939,207 pesos mxn¹². Tomando en cuenta esta estimación se puede confirmar que nuestro modulo ORC se encuentra en el rango de costos aceptable, sin embargo, está muy justo, porque una cosa es el costo de manufactura del módulo, y otra el precio de venta que se le asignaría si se piensa comercializar. Es por esto, que debe buscarse una alternativa para abaratar costos y seguir en la contienda para la venta de módulos de ciclos binarios.

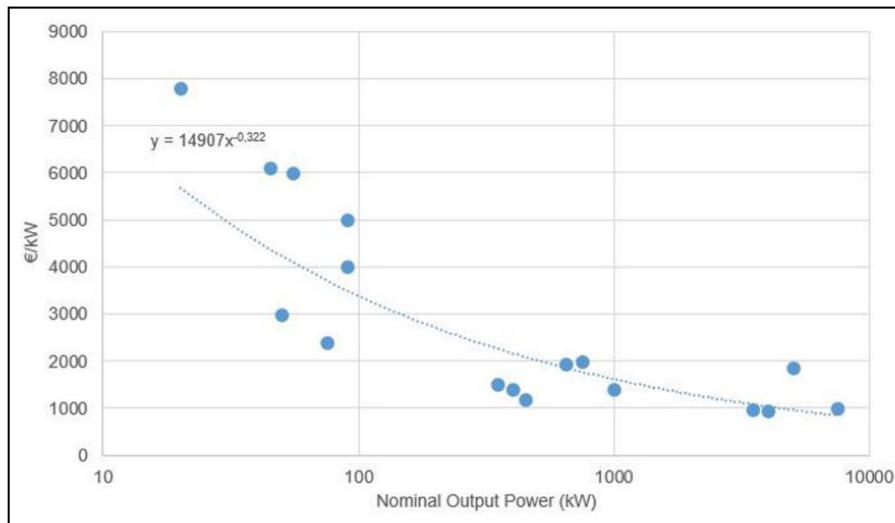


Figura 4.8 Costos en euros por kW de los ORC en el mercado. (Song, Song, & Gu, 2015)

4.3.4 Áreas de oportunidad. Empresas con remanentes energéticos en el país.

Como hemos mencionado anteriormente, como un caso ajeno a la geotermia, una de las grandes áreas de oportunidad para la instalación de los módulos ORC son las empresas que presentan remanentes energéticos en sus procesos. El mercado estaría representado por empresas que, por sus actividades, demanden energía térmica y eléctrica en grandes volúmenes.

En este estudio en particular me voy a enfocar en las industrias que por naturaleza consumen la mayor cantidad de energía en sus procesos, razón por la cual suelen tener una buena cantidad de remanentes que solo van a la atmósfera, fomentando así la contaminación ambiental y de la misma manera, desperdiciando un gran potencial energético que pudieran generar. Estas industrias son la química, automotriz, alimentaria y metalúrgica y cementera.

¹² Considerando el precio del euro en 21.03 MXN\$, valor consultado el 30/05/2022

4.3.4.1 Industria Química

La industria química ocupa el 4to lugar de consumo de energía en la industria manufacturera. Actualmente en México, según datos del DENUE existen 5,931 unidades económicas dedicadas a esta rama de la industria, de las cuales el 79.3%, o sea la mayor parte, corresponde a microempresas, el 11% se clasifican como pequeña empresa, el 5% son medianas empresas y solo el 4.7% son grandes empresas.

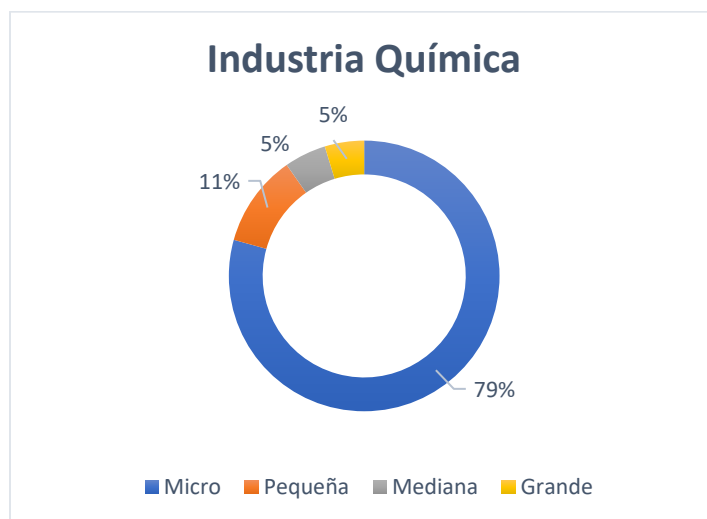


Figura 4.9 Tamaño de la industria química en el país. Gráfica propia con datos del DENUE

Esta industria tiene una amplia cantidad de ramas que se derivan de ella, algunas de las cuales se mencionan en la tabla siguiente:

Tipo de actividad	Unidades económicas
Fabricación de productos químicos básicos.	606
Fabricación de resinas y hules sintéticos, y fibras químicas.	312
Fabricación de fertilizantes, pesticidas, y otros agroquímicos.	383
Fabricación de productos farmacéuticos.	908
Fabricación de pinturas, recubrimientos y adhesivos.	707
Fabricación de jabones, limpiadores y preparaciones de tocador.	1794
Fabricación de otros productos químicos. (tintas, explosivos)	1221

Tabla 4.4 Número de unidades económicas por tipo de actividad en la industria química. Elaboración con datos del DENUE, INEGI, 2022.

Hasta el 2019, según datos del Sistema de Cuentas Nacionales de INEGI, la industria química tiene una aportación del 2.1% del PIB a nivel nacional.

A continuación, se presentan las temperaturas de proceso de las principales subcategorías de la industria química:

Producción de resinas y adhesivos	Mezcla y reacción de componentes a temperatura de proceso de 200-250°C
--	---

Producción de jabón	Preparación de lejía salina a temperatura máxima de proceso de 80-90°C
	Desdoblamiento de las grasas con vapor de agua 250°C
Fabricación de fósforo	Calentamiento del fosfato tricálcico a 1450°C para la liberación de fósforo en forma de vapor
Producción de pigmentos inorgánicos cerámicos	Mezcla y calcinación de materias primas a temperaturas de 500-1400°C
	Combustión en el reactor alcanzando temperaturas de 800-2000°C
Fabricación de gases industriales	Óxido nitroso: descomposición química del nitrato de amonio a temperatura de 250°C en un reactor controlado.
Producción de adhesivo blanco	Mezcla y calentamiento en reactores a 80°C

Tabla 4.5 Ejemplos de temperaturas de proceso y de rechazo en la industria química.

4.3.4.2 Industria Automotriz

México, la segunda economía más grande de América Latina, cuenta con una de las industrias manufactureras más importantes de la región. Tal es así que México es el país latinoamericano que produce la mayor cantidad de vehículos a motor y también se encuentra en la séptima posición entre los mayores productores automovilísticos a nivel mundial. Haciendo una investigación en DENUE, se identificó que existen 3,146 unidades económicas dedicadas a este sector de la industria, de los cuales el 47.74% corresponde a las micro empresas, mientras el 12.52% constituye a las pequeñas empresas, el 10.55% a la mediana, y el 29.18% a las grandes empresas.

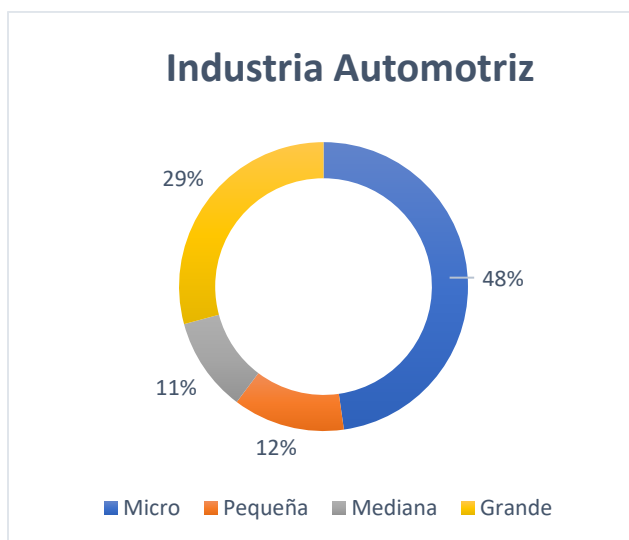


Figura 4.10 Tamaño de la industria automotriz en México. Gráfica propia con datos del DENUE

La industria automotriz se divide en los siguientes sectores.

Tipo de industria	Unidades económicas
Fabricación de automóviles y camiones	73
Fabricación de carrocerías y remolques	922
Fabricación de partes para vehículos automotores	2151

Tabla 4.6 Número de unidades económicas por tipo de actividad en la industria automotriz.

La industria automotriz representa el 3.8% del Producto Interno Bruto nacional, según datos del INEGI.

Proceso de laminación interior	Temperatura: 120°C
Secado de pintura en horno	Temperaturas entre 60°C y 150°C (Dependiendo del tipo de recubrimiento)
Proceso de estampado	<p>Está el estampado caliente para piezas de acero, principalmente para elementos estructurales y de seguridad. La temperatura suele llegar hasta los 910°C.</p> <p>El estampado en frío suele utilizarse para la carrocería. Las temperaturas comunes son menores a los 200°C.</p>
Proceso de enfriamiento	Temperaturas de agua residual de 80-90°C

Tabla 4.7 Ejemplos de temperaturas de proceso y de rechazo en la industria automotriz.

4.3.4.3 Industria Alimentaria

La industria alimentaria es una de la más relevantes debido a que está conformada por un gran número de actividades económicas. En cuanto a los remanentes energéticos, representan un mayor potencial comparada con otras industrias, dado que los procesos suelen tener necesidades térmicas importantes.

La industria alimentaria emplea más del 4% de los trabajadores de la economía mexicana. De igual forma, la producción bruta en esta industria representa casi el 6.5% del total de la economía. Es una industria que pese a las adversidades nunca perderá su relevancia, un ejemplo claro es que con la pandemia del Covid-19, la economía nacional en el 2020 decayó 8.2%, no obstante, el Producto Interno Bruto (PIB) agroalimentario resistió y decayó solamente 0.4% durante el mismo periodo. (Possehl, 2022)

Según datos del DENU, en el país existen 217,345 unidades económicas dedicadas a la industria alimentaria, de las cuales 98.85% corresponden a micro empresas, lo que corresponde a la gran mayoría. La pequeña empresa constituye el 0.65%, y las medianas y grandes empresas cuentan cada una con el 0.25% de la industria.

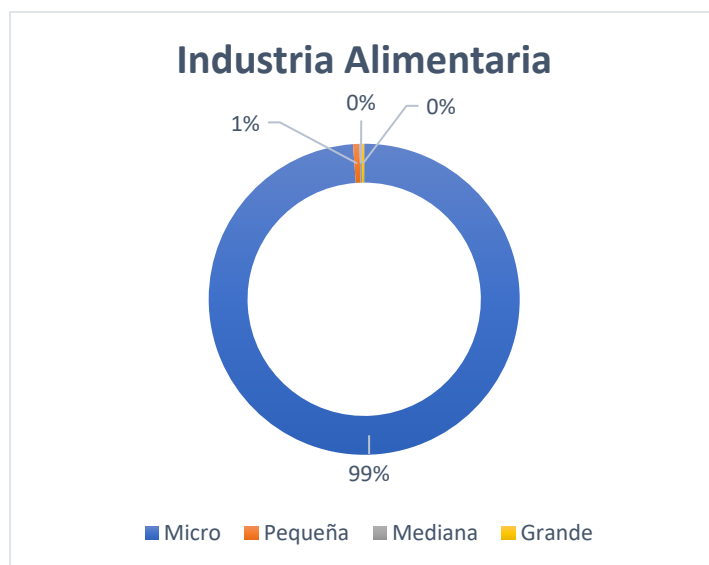


Figura 4.11 Tamaño de la industria alimentaria en México. Gráfica propia con datos del DENU

Algunas de las ramas que conforman la industria alimentaria se mencionan a continuación:

Tipo de industria	Unidades económicas
Elaboración de alimentos para animales	750
Molienda de granos y de semillas y obtención de aceites y grasas	1 521
Elaboración de azúcares, chocolates, dulces y similares.	3 882
Conservación de frutas, verduras y alimentos preparados.	2 238
Elaboración de productos lácteos.	16 674
Matanza, empaclado y procesamiento de carne de ganado, aves y otros animales comestibles	4 288
Preparación y envasado de pescados y mariscos	238
Elaboración de productos de panadería y tortillas	180 198
Otras industrias alimentarias	7 556

Tabla 4.8 Número de unidades económicas por tipo de actividad en la industria alimentaria.

Para el año 2021, según datos del INEGI, la industria alimentaria presenta un porcentaje de participación del 4.5% del PIB nacional.

Como un ejemplo puntual de uno de los procesos de la industria alimentaria, se va a tomar la elaboración de refrescos. En este proceso, se emplea energía térmica por medio de la quema de combustible y generación de vapor, el cual se utiliza para la elaboración del jarabe, el escape de calor se da a través de gases de combustión. En la tabla siguiente se muestran las temperaturas principales para la elaboración de esta bebida.

Elaboración de refrescos	Proceso: Cocción Maquinaria: Marmita	Temperatura: 85°C Gases de combustión 140°C
	Proceso: Enfriamiento Maquinaria: Intercambiador de calor	Temperatura de proceso: de 85°C a 20°C

Tabla 4.9 Ejemplos de temperaturas de proceso y de rechazo en la industria alimentaria.

En este caso en específico los gases de combustión entran en el rango adecuado para nuestro sistema ORC, lo que lo convierte en un posible cliente para el ciclo binario.

4.3.4.4 Industria metalúrgica

La industria de la metalurgia se conforma por distintas subcategorías. El sector minero metalúrgico contribuye en el 2.3% del Producto Interno Bruto nacional, de acuerdo con cifras del INEGI, en 2020.

La industria metalúrgica se divide en la fabricación de productos metálicos y a las industrias metálicas básicas. El DENUe registra datos de que actualmente en el país existen 76,080 unidades económicas pertenecientes a esta rama de la industria, de las cuales 97.2% equivalen a la micro industria, el 1.6% corresponde a la pequeña empresa y solamente el 0.68% y 0.52% representan a la mediana y grande industria, respectivamente.

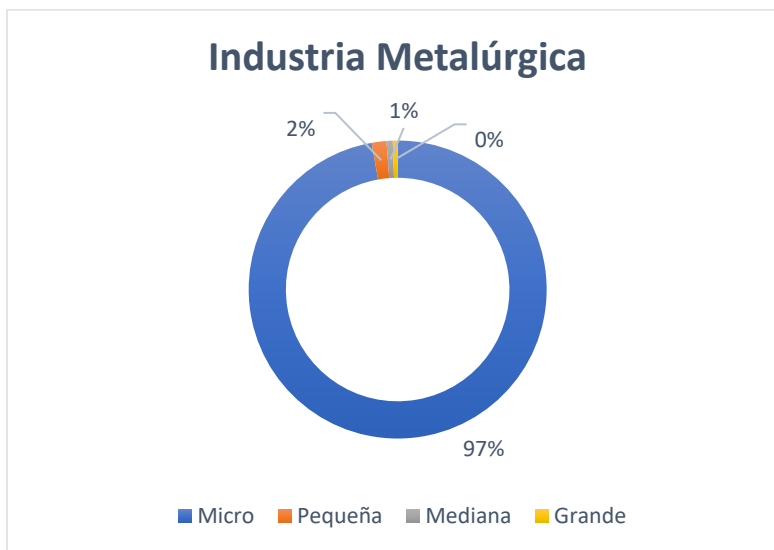


Figura 4.12 Tamaño de la industria metalúrgica en México. Gráfica propia con datos del DENUe

Las ramas que conforman a la industria metalúrgica se nombran a continuación junto con las unidades económicas que lo conforman.

Tipo de industria	Unidades económicas
Industrias metálicas básicas.	
Industria básica del hierro y del acero	37
Fabricación de productos de hierro y acero.	640
Industria básica del aluminio.	148
Industria de metales no ferrosos, excepto aluminio.	155
Moldeo por fundición de piezas metálicas.	545
Fabricación de productos metálicos.	
Fabricación de productos metálicos forjados y troquelados.	543
Fabricación de herramientas de mano sin motor y utensilios de cocina metálicos.	661
Fabricación de estructuras metálicas y productos de herrería.	60 807
Fabricación de calderas, tanques y envases metálicos.	442
Fabricación de herrajes y cerraduras.	265
Fabricación de alambre, productos de alambre y resortes.	750
Maquinado de piezas metálicas y fabricación de tornillos.	9 124
Recubrimientos y terminados metálicos.	792
Fabricación de otros productos metálicos.	1 171

Tabla 4.10 Número de unidades económicas por tipo de actividad en la industria metalúrgica.

La industria del metal cuenta con procesos que requieren de altas temperaturas, las cuales se alcanzan en hornos. En la tabla siguiente se mencionan algunos de los hornos que se utilizan más en esta industria, así como sus temperaturas de operación.

Tipo de horno	Temperatura de proceso	Temperatura de rechazo
Alto Horno	1,100 – 1,400 °C	1000 °C
Convertidor LD	2,500 °C	1,500 °C
Horno eléctrico de arcos	600 – 1,400 °C	150 – 300 °C

Tabla 4.11 Ejemplos de temperatura de proceso y de rechazo en la industria metalúrgica.

Ahora bien, se puede determinar que cualquier empresa en el mayor de los casos, buscaría contar con un buen plan de eficiencia energética, la cual tiene como objetivo la obtención de los mismos bienes y servicios energéticos, pero gastando menos energía, con la misma o mayor calidad de vida, contaminando menos y a un precio inferior.

Estos objetivos se pueden cumplir siempre y cuando se invierta en un plan energético adecuado para cada empresa, teniendo en cuenta que en esta rama de la eficiencia energética, las inversiones no siempre son redituables inmediatamente, y que hay que tener en mente que el retorno de la inversión suele llevar un par de años, razón por la cual en repetidas ocasiones, existe un rechazo por parte de dichas industrias a atreverse a invertir, no obstante, por esta razón es que se hace un plan a futuro, para que se pueda admirar un panorama a largo plazo, con los beneficios económicos y medioambientales que sugieren el uso de energías renovables como generación distribuida para su beneficio.

Aquí es donde entra la implementación de los módulos ORC, pues aprovechando sus propios remanentes térmicos se puede generar potencia eléctrica que pueda disminuir las

facturas de luz en gran medida, sin generar una cantidad considerable de desperdicios ni contaminación al medio ambiente.

En el estudio anterior podemos admirar algunas de las industrias más importantes en el país, donde en algunas de ellas se pudieran presentar remanentes térmicos capaces de transmitir la energía necesaria a un sistema ORC.

El mercado donde se podría implementar los ORC es en las pequeñas y medianas empresas, las cuales según García B. B. (2021) [72], dentro de la industria, son las que tienen la mayor proporción de consumo eléctrico en el país.

Industria	Pequeña empresa	Mediana Empresa	Total
Química	652	297	949
Automotriz	394	332	726
Alimentaria	1413	543	1956
Metalúrgica	1217	517	1734
		TOTAL	5365 Unidades

Tabla 4.12 Pymes en México como posible mercado para la aplicación de los ORC.

México cuenta con 5365 Pymes que pudieran aplicar como posible mercado para la implementación de los ORC, sin embargo, sería imperativo realizar otro estudio más profundo que indicara cuántas de estas empresas ya cuentan con un sistema de energía renovables para satisfacer sus demandas energéticas, de cuánto son estas demandas, sus temperaturas específicas de remanentes térmicos y la cantidad, así como saber cuántas de ellas estarían interesadas en invertir en un ORC que les ofreciese 100 kW de capacidad para así poder satisfacer sus demandas, con la ventaja de poder ser llamados como una empresa que se preocupa por el medio ambiente, y evitar como se ha mencionado con anterioridad el desperdicio de dichos remanentes, los cuáles podrían ser una solución si se les diera el uso adecuado.

4.4 Módulos de ORC instalados actualmente en el mundo.

Una buena estimación del estado actual del mercado de los módulos ORC en el mundo es identificar cuántos de estos se encuentran instalados con las condiciones de operación como las nuestras, es decir, módulos de hasta 100 kW de potencia neta.

De acuerdo con datos recabados del ORC World Map, se determina que existen alrededor de 285 proyectos geotérmicos y de remanentes energéticos que cumplen con la característica descrita, de los cuales 12 corresponden a proyectos geotérmicos y 273 a proyectos para remanentes energéticos. La mayor concentración de instalación de módulos ORC de pequeña escala se encuentra en Europa, sin embargo, también empiezan a hacer presencia en América, especialmente en E.U.A y Canadá.

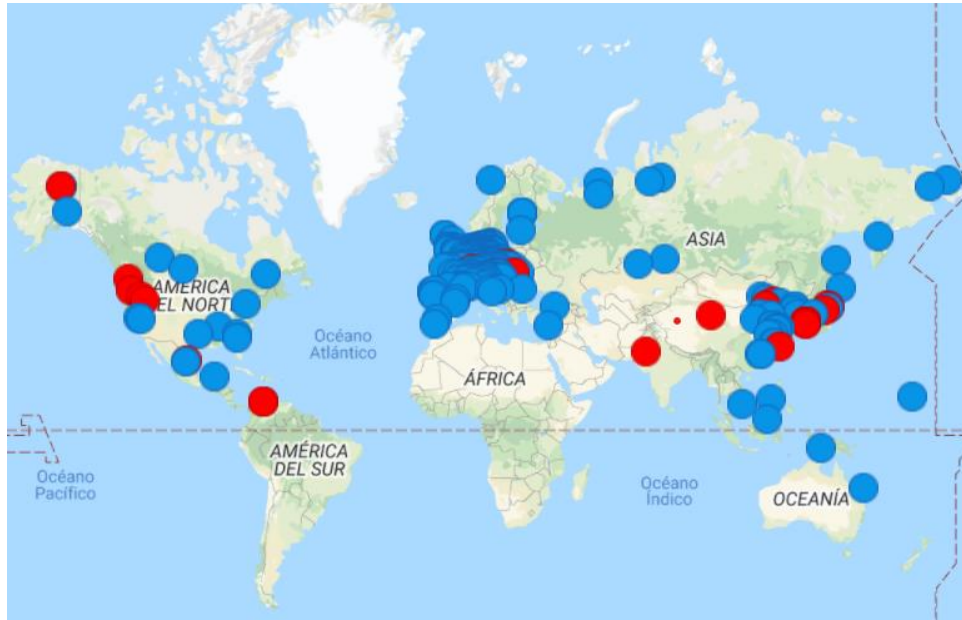


Figura 4.13 Módulos de ORC instalados mundialmente, operados con geotermia (rojo) y remanentes energéticos (azul). Imagen extraída del ORC World Map. Marzo 2022

Con este análisis nos es posible determinar que nuestro potencial mercado se encontraría en las pequeñas y medianas empresas, pues el módulo ORC con el que contamos es de una potencia relativamente pequeña, la cual sería ideal para éstas por el tamaño de sus producciones y el consumo energético en sus operaciones.

4.5 Comparación con otras tecnologías.

4.5.1 Energía Solar.

Como bien es sabido, el Sol es la principal fuente de energía y sustento de todos los procesos que se llevan a cabo en nuestro planeta tierra. Su energía deriva de una serie de reacciones de fusión nuclear que se llevan a cabo en su interior. La energía Solar se considera como una fuente de energía inagotable, renovable y limpia.

La energía solar se puede aprovechar en forma de energía térmica o energía fotoeléctrica para su consumo posterior. El elemento encargado de transformar la energía solar y captar la radiación solar es el panel solar o panel fotovoltaico.

En los últimos años la energía solar ha ganado mucho peso, debido a que cada vez es más sencillo acceder a empresas que te diseñen un sistema de captación solar, el cual se puede instalar y aplicar básicamente en cualquier lugar que se encuentre a la intemperie, y en la escala que uno desee.

En este caso se va a comparar el costo de un campo solar fotovoltaico que pueda entregar 100 Kw de potencia neta con nuestro módulo ORC.

Según datos recopilados por la revista Besun Energy¹³, hasta el 2019 en España, el costo por watt en placas fotovoltaicas rondaba entre 1.10 y 2 euros, lo que equivaldría a \$21.9 y \$39.82 pesos mexicanos.¹⁴ Si se considera entonces que para la instalación se necesitan 100 kW, el costo total de inversión en los paneles fotovoltaicos sería de \$2,190,000 a \$3,982,000, aproximadamente.

Haciendo la cotización de un sistema comercial de 100 kW con el grupo Infinite Energy, se obtuvieron los siguientes datos.

Número de paneles	380 a 410
Espacio requerido	656 m ² mínimos
Tiempo de recuperación de inversión	3-5 años
Potencia producida al día	430 – 480 kWh
Ahorro anual en factura de luz (estimación)	\$37,500 USD o \$746,868.75 pesos mx
Costo promedio de inversión	\$130,000 - \$200,000 USD o \$2,589,145 - \$3,983,300 pesos mx

Tabla 4.14 Resumen de datos para sistema de 100 kW con paneles solares.

Si se comparan entonces, los costos de inversión de una instalación con celdas fotovoltaicas y un ciclo binario iiDEA 100, se obtiene un costo de inversión de \$3,983,300 contra \$6,579,154, lo que, pasándolo a datos porcentuales, se traduciría como un ahorro de aproximadamente 40% si se usara el sistema fotovoltaico, al menos en la inversión. Estos resultados pueden parecer desalentadores para el ciclo binario, ya que la energía por celdas fotovoltaicas parece ser menos costosa, sin embargo, una de las mayores características a tomar en cuenta es que estos solo almacenan energía cuando hay luz solar, es decir, que sus factores de planta no suelen ser muy elevados y rondan entre el 10 y el 30% (Núñez, 2015). Tomando esto en consideración, los paneles fotovoltaicos serán apropiados para las empresas que operen solo cuando haya luz solar, mientras que el ciclo binario, puede estar operando y generando prácticamente todo el tiempo, cosa que podría resultar en una mejor inversión a largo plazo.

Otro beneficio del ciclo binario iiDEA 100 es el espacio de instalación que requiere, pues el módulo por si solo necesita un área de 14 m², comparado con los paneles que requieren de al menos 656m². Es importante considerar que aún faltaría considerar el espacio de la conexión del ciclo al sistema térmico y agua de enfriamiento, sin embargo, depende de la aplicación, es decir, si el iiDEA 100 fuese utilizado para geotermia o para el aprovechamiento de remanentes térmicos, donde se tendría que realizar un diseño de instalación distinto para cada caso.

Como ejercicio, se va a hacer un rápido análisis del flujo de efectivo en el tiempo de una instalación de paneles fotovoltaicos, esto con el fin de saber cómo afecta el factor de planta en dichos sistemas en el tiempo de retorno de inversión.

¹³ [Precio de Instalación Fotovoltaica de 100 KW ▷ Besun Energy®](#)

¹⁴ Costo del euro de \$21.1 pesos mexicanos, consultado el 19/05/2022

En la tabla siguiente se muestran algunos de los factores más relevantes que se tomaron en cuenta para dicho análisis económico.

Costo de inversión inicial	\$200,000 USD o \$746,868.75 pesos mx
Costo de mantenimiento anual	\$2,000 USD o \$40,740 pesos mx
Tiempo de vida del proyecto	25 años
Factor de planta	30 %
Tasa de interés anual	3%

Tabla 4.15 Consideraciones iniciales para el análisis económico de un sistema de paneles fotovoltaicos.

Los costos de mantenimiento se estimaron con ayuda de un proveedor mexicano de paneles solares¹⁵, considerando lo que costaría anualmente hacer la limpieza de los paneles, pues la suciedad puede afectar considerablemente en su rendimiento. Los resultados del análisis se plasman a continuación.

Paneles Fotovoltaicos 100 kW	
Costo nivelado de generación USD\$/kWh	\$0.09
Costo nivelado de generación en pesos mexicanos. \$/kWh	\$1.79
Tiempo de recuperación	5 años
TIR	25.88 %

Tabla 4.16 Resultado del análisis económicos de la instalación de paneles fotovoltaicos.

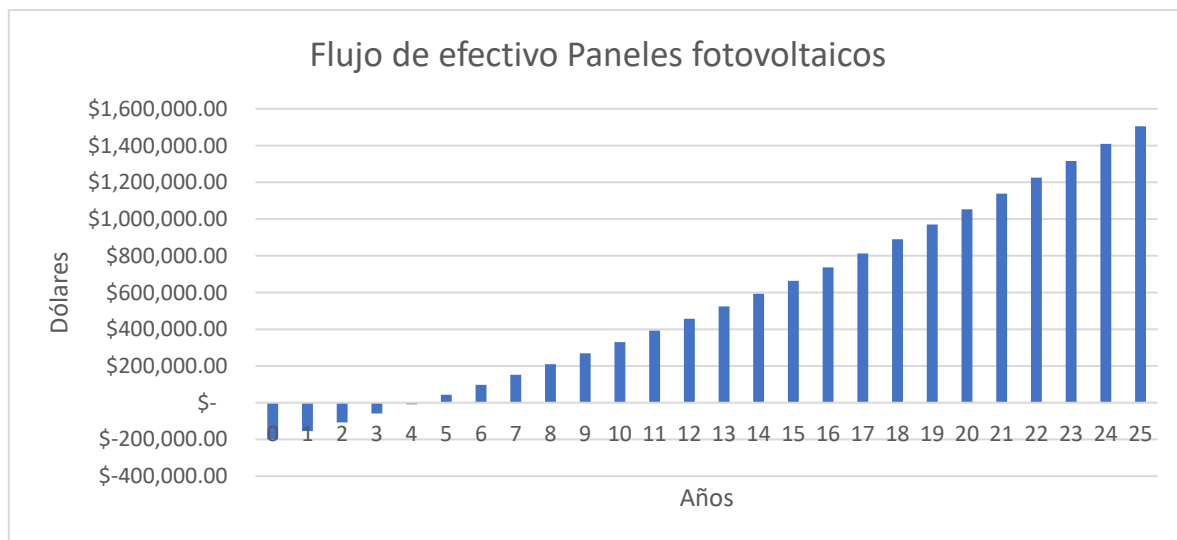


Figura 4.14 Flujo de efectivo de la instalación de paneles solares.

¹⁵ <https://www.labodegasolar.com/blogs/blog/cual-es-el-costo-de-mantenimiento-de-un-panel-solar>

Tal como se especifica en la tabla 4.16, el tiempo de retorno de inversión es de aproximadamente 5 años, disminuyendo en 3 años el estimado de retorno de inversión de los módulos ORC, razón por la cual el TIR aumenta de igual manera en los sistemas con paneles solares, no obstante, es importante mencionar que, aunque los resultados parecen desalentadores, se mantiene la ventaja de la implementación de los ORC respecto a su generación, si lo que se necesita es satisfacer una alta demanda energética a lo largo del año.

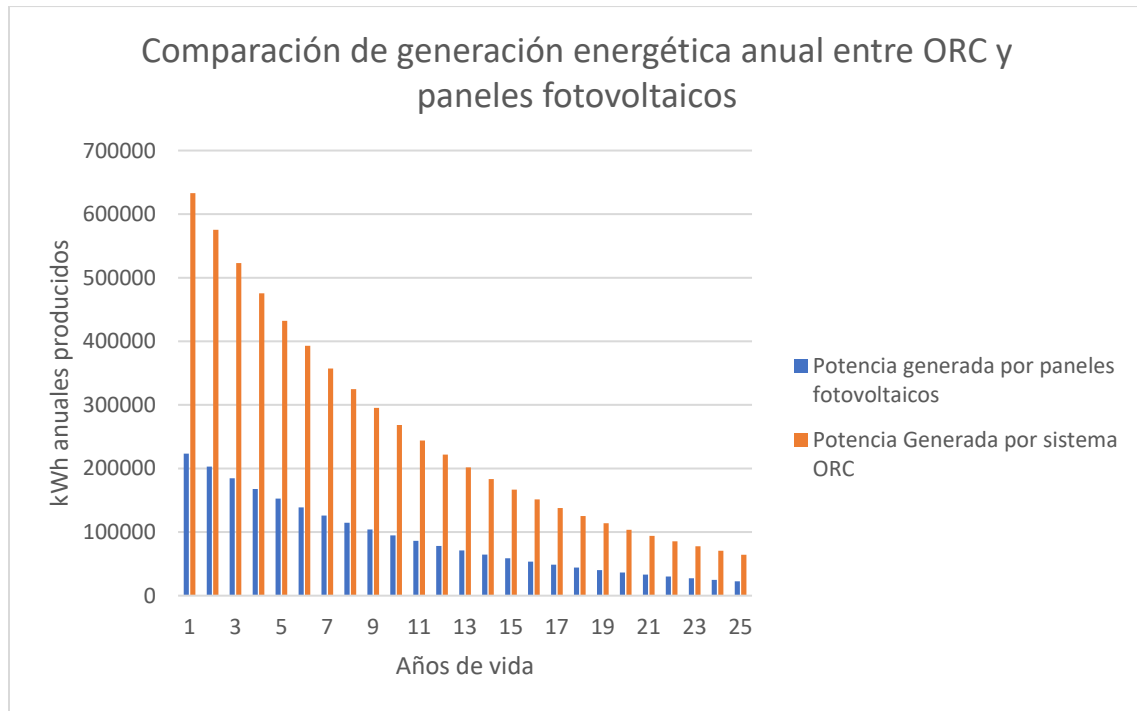


Figura 4.15 Generación energética anual con sistema ORC y paneles solares

En la gráfica anterior se puede observar la abismal diferencia de generación entre un sistema y otro, esto debido a los factores de planta con los que operan, por lo que el factor operativo de un sistema ORC resultaría conveniente si lo que se necesita es una mayor demanda energética anual, pues un sistema de paneles solares de 100 kW de capacidad produce aproximadamente 480kWh al día, mientras que un sistema ORC podría entregar hasta 1900 kWh.

En este punto no se confirma ni se descarta la hipótesis de que un sistema ORC es mejor, económicamente hablando, que un sistema de paneles fotovoltaicos, porque en cuanto a inversión, es más económico instalar un sistema fotovoltaico, sin embargo, si lo que se busca es una retribución a largo plazo, el sistema ORC representa la mejor opción debido a su alta eficiencia, y su mayor generación eléctrica anual.

4.5.2 Energía Eólica.

La energía eólica transforma la fuerza de un recurso inagotable, como lo es el viento, en electricidad, esto a través de un aerogenerador. El proceso de extracción se realiza principalmente gracias al rotor, que transforma la energía cinética en energía mecánica, y al generador, que transforma dicha energía mecánica en eléctrica. Se trata de una energía renovable, limpia, eficiente y segura.

De acuerdo con Yacoubou (2022) [73], el costo de un aerogenerador de baja potencia, como lo sería uno de 100 kW, tiene un costo promedio de \$3,000 USD por cada kilowat de capacidad, es decir, \$300,000 USD.

Considerando de la misma manera que el costo de instalación de la turbina eólica representa un gasto adicional del 10% del costo del aerogenerador. Haciendo un análisis más a fondo de la instalación, se resumen los datos siguientes:

Costo aerogenerador	\$300,000 USD o \$5,960,880 pesos mexicanos
Instalación	\$30,000 USD o \$596,088 pesos mexicanos
Espacio requerido promedio	300 m ² *
Total de inversión	\$6,556,968

Tabla 4.17 Resumen de datos y costos para Sistema eólico de 100 kW.

*<https://cienciadehoy.com/cuanta-tierra-se-necesita-para-aerogeneradores/>



Figura 4.16 Aerogenerador de 100 kW "nED 100" para autoconsumo industrial.

Comparando entonces con los datos anteriores el ciclo binario de 100 kW contra un aerogenerador de la misma potencia, se concluye que, en cuanto al costo de inversión, una turbina eólica representaría una inversión casi igual a la instalación de un módulo de ciclo binario con todos sus componentes listos para operar, pues el primero tiene un costo de \$6,556,968 pesos mxn, contra \$6,581,784 pesos mxn del iiDEA 100.

Ahora, en cuanto al factor de planta que ofrece un aerogenerador, éste va del 10 al 40%, esto debido a que no a todas horas se tiene viento, de la misma manera en la que debe

considerarse este punto como clave en su instalación, pues se debe tener en cuenta la intensidad y frecuencia de los vientos. Es necesario buscar áreas con velocidades de viento superiores a 5-6 m/s durante al menos 2,200 horas por año [74].

Una vez más el factor de planta que se tiene con la geotermia resalta como una de las mayores oportunidades de escoger este tipo de energía limpia, pues se cuenta con ella las 24 horas del día, sin importar las condiciones ambientales.

El área de instalación va a depender de la capacidad de la planta geotérmica, o en el caso de ser utilizado para remanentes térmicos, se tendría que hacer un estudio del lugar, no obstante, el módulo del ciclo binario seguiría teniendo las mismas dimensiones de 14 m².

Haciendo el mismo ejercicio del punto anterior, se consideran algunos puntos clave para saber cómo se representaría el flujo efectivo para un sistema y otro. En cuanto a la implementación de una turbina eólica, se consideran los siguientes factores.

Costo de inversión inicial	\$330,000 USD o \$6,556,968 pesos mx
Costo de mantenimiento anual	\$6,600 USD o \$179,100 pesos mx¹⁶
Tiempo de vida del proyecto	20 años
Factor de planta	40 %
Tasa de interés anual	3%

Tabla 4.18 Consideraciones iniciales para el análisis económico de un sistema con aerogenerador.

Los resultados del análisis se plasman a continuación.

Paneles Fotovoltaicos 100 kW	
Costo nivelado de generación USD\$/kWh	\$0.12
Costo nivelado de generación en pesos mexicanos. \$/kWh	\$2.52
Tiempo de recuperación	7 años
TIR	14.80 %

Tabla 4.19 Resultado del análisis económicos de la instalación de paneles fotovoltaicos.

¹⁶ Según la Asociación Danesa de la energía eólica, en aerogeneradores nuevos el costo promedio anual de mantenimiento corresponde a aproximadamente a 2% del costo del aerogenerador. <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/econ/oandm.htm>

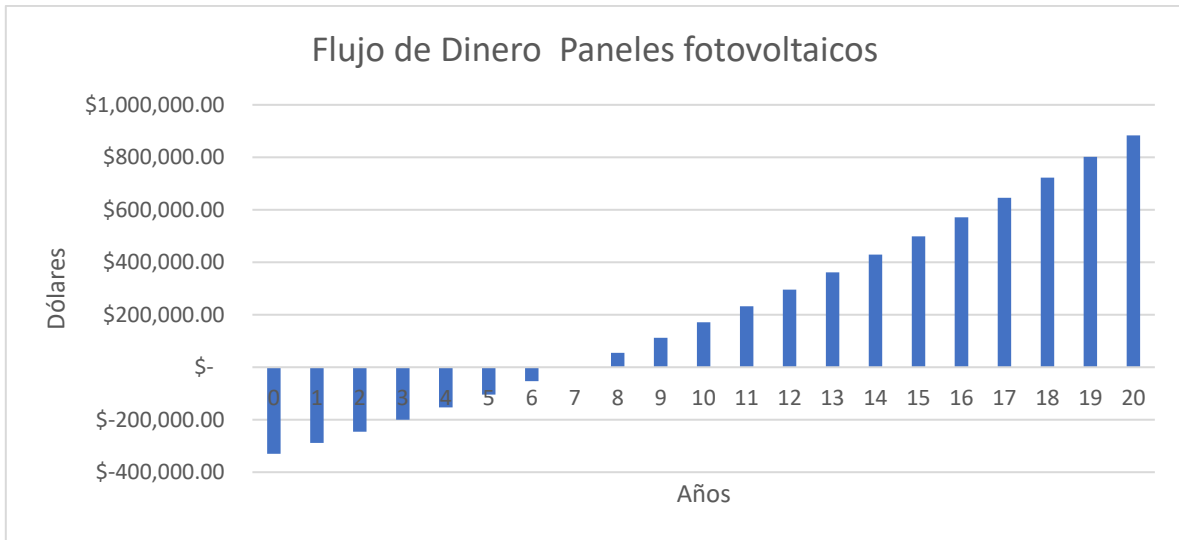


Figura 4.17 Flujo de efectivo de un sistema con aerogenerador de 100 kW de potencia.

Analizando los resultados obtenidos y comparándolos con los resultados del módulo ORC diseñado, se concluye que, en este caso particular, de un sistema de potencia de 100 kW, es más conveniente instalar un módulo de ORC, pues, aunque el tiempo de inversión es ligeramente menor, el costo nivelado de generación se incrementa considerablemente, esto debido al bajo factor de planta comparado con un sistema ORC.

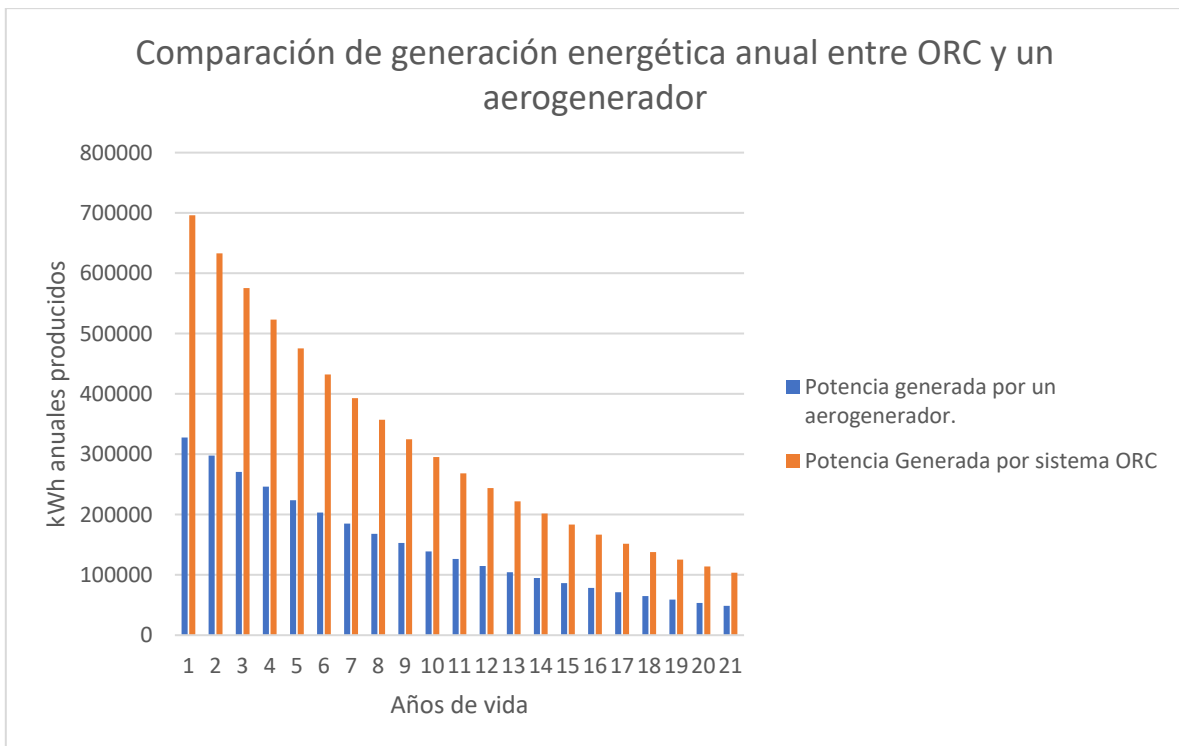


Figura 4.18 Comparación de generación energética anual entre un ORC y un aerogenerador.

En este caso, se repite el caso de los sistemas fotovoltaicos y se compara la diferencia de generación de potencia anual producida por un sistema y otro, y una vez más el sistema ORC sobresale en gran medida, comparando una generación promedio al día de los sistemas eólicos de 900 kWh, contra los mismos 1900 kWh que ofrece un sistema de ORC.

4.6 Fuentes Consultadas.

- [59] Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. (1996). *Thermal Design and Optimization*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [60] Lukauski, M. (2009). *Design and optimization of standardized Organic Rankine Cycle Power Plant for European Conditions*. Islandia: Tesis de Maestría.
- [61] Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. (1996). *Thermal Design and Optimization*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [62] Pál, T. (2017). *Perspectives for mini-scale ORC power plants coupled with internal combustion engines in the European Union*. Estocolmo: Tesis de Maestría.
- [63] Jaimovich, O. (2007). *Costos de la Generación Geotérmica*. Buenos Aires: 02/07.
- [64] CFE. (15 de 12 de 2016). Obtenido de <https://www.cfe.mx/hogar/nuevocontrato/Documents/contratacionconinterconexion.pdf>
- [65] Hance, C.N., 2005. *Factors affecting costs of geothermal power development*. Publication of the Geothermal Energy Association for the U.S. Department of Energy, Washington D.C., 64 pp.
- [66] Sanyal, S. (2004). *Cost of Geothermal Power and Factors that Affect it*. California, USA.: Artículo para el Geothermal Reservoir Engineering.
- [67] Entingh, D., & Mc Veigh, J. (2003). *Historical Improvements in Geothermal Power Systems Costs*.
- [68] COPAR. (2015). Obtenido de <https://es.scribd.com/document/389714519/COPAR-GEN-2015-V1>
- [69] Macchi, E., & Astolfi, M. (2017). *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems. Technologies and Applications*. Oxford, UK: Elsevier.
- [70] Tocci, L., Pal, T., Pasmazoglou, I., & Franchetti, B. (2017). *Small Scale Organic Rankine Cycle (ORC): A Techno-Economic Review*. Roma, Estocolmo: Artículo.
- [71] Song, J., Song, Y., & Gu, C.-w. (2015). Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines. *ELSEVIER*.

[72] García, B. B. (12 de 02 de 2021). *Reportacero*. Obtenido de <https://reportacero.com/consume-empresa-mediana-39-de-electricidad-generada-en-mexico-caintra/>

[73] Yacoubou, Jeanne (25 de marzo del 2022) Obtenido de <https://greencoast.org/wind-turbine-costs/>

[74] *EALDE*. (10 de 12 de 2020). Obtenido de <https://www.ealde.es/proyecto-parque-eolico/>

Capítulo V

5.1 Propuestas de mejora

Uno de los problemas más grandes que tiene el IDEA 100 es que, como se describió en el capítulo anterior, el costo de construcción del módulo ORC es demasiado elevado, y no es altamente competitivo con otro tipo de tecnologías en el mercado por el mismo motivo, sobre todo si se espera tener una ganancia considerable de éste.

Analizando el costo de cada uno de los componentes es evidente que la turbina representa la mayor parte de la inversión para el ciclo binario.



Figura 5.1 Comparación de costos entre los equipos del IDEA100

En la gráfica anterior es más evidente lo fuera de rango que se encuentra el costo de la turbina, sin embargo, en el capítulo 3 ya se mencionaron las ventajas de adquirir este tipo de expansor, no obstante, cabe la posibilidad de que se pueda diseñar una turbina, es decir, usar tecnología propia y diseñarla desde cero, lo que disminuiría significativamente el costo del ciclo. Se hizo una estimación presupuestaria de lo que implicaría el diseño de una turbina que cumpla con las características necesarias para el ciclo binario, y se determinó que un centro de torneado cobraría aproximadamente \$500,000.00 pesos mxn por ella, esto haciendo un aproximado considerando como referencia el costo de torneado de la turbina del ciclo binario de 10 kW que se diseñó con anterioridad en grupo IIDEA.

Tomando como cierta la estimación anterior, se volvió a sumar el costo total de los equipos con la nueva turbina, los resultados se ilustran a continuación.

	Ciclo de 100 kW	Ciclo de 100 kW (con tecnología propia)
Turbina-generador	\$2,551,077.81	\$500,000.00
evaporador	\$409,685.66	\$409,685.66
condensador	\$263,967.39	\$263,967.39
bomba ORC	\$457,385.00	\$457,385.00
Bomba AE	\$20,549.00	\$20,549.00
Torre de enfriamiento	\$395,265.00	\$395,265.00
Tanque de almacenamiento	\$23,699.00	\$23,699.00
Refrigerante	\$452,680.67	\$452,680.67
Carcasa	\$65,000	\$65,000
Total sin IVA	\$4,639,309.53	\$2,588,231.72
Total con IVA	\$5,381,599.05	\$3,002,348.80

Tabla 5.1 Comparación del costo de los equipos con y sin tecnología propia.

Como es evidente en la tabla anterior, el costo de los equipos disminuye considerablemente, lo que se vería reflejado en un menor costo total del módulo ORC y una posible mejor ganancia de éste.

Haciendo así un nuevo balance de efectivo, tomando en consideración el nuevo costo del módulo ORC, se obtienen los resultados siguientes.

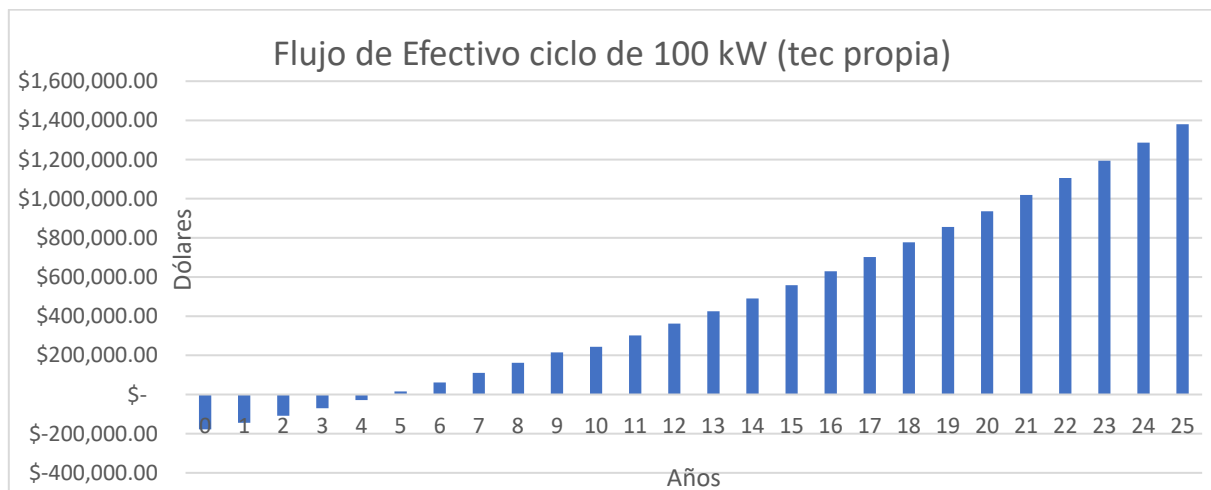


Figura 5.2 Flujo de efectivo del ORC de 100 kW usando tecnología propia.

Tamaño 100 kW (tecnología propia)	
Capital invertido USD\$/kW	\$1,782.88
Capital total invertido en MXN\$	\$3,550,427.23
Costo nivelado de generación USD\$/kWh	\$0.05
Costo nivelado de generación en MXN\$/kWh	\$1.00
Tiempo de recuperación	5 años
TIR	24%

Tabla 5.2 Resumen económico de ORC de 100 kW usando tecnología propia.

Analizando los resultados anteriores, se puede determinar que diseñar nuestra propia turbina sería una gran opción si lo que se busca es reducir costos, ya que significa un ahorro estimado de \$2,000,000.00, dinero que se podría agregar al precio final del módulo ORC si se planea comercializar. Hay que tomar en cuenta que los costos que se estimaron son solo del armado del módulo, por lo que se tendría que proponer un precio de venta para el IDEA 100 para que pueda ser competitivo en el mercado; mientras más barato sea para nosotros, más rentable será el proyecto, así como más atractivo para los posibles clientes. Cabe mencionar que esta es sólo una propuesta que se pudiera implementar, se debería ahondar más en los costos finales si se considerara como una buena alternativa para el diseño del IDEA 100.

5.2 Conclusiones

La geotermia es una de las energías limpias con mayor potencial, debido a que tiene un grande número de aplicaciones, lo que se refleja en los distintos tipos de yacimientos y su rango de temperatura que va desde los 20°C hasta los 400°C. El aprovechamiento de la energía del subsuelo permite reducir el uso de los combustibles fósiles y contribuir al logro de la autosuficiencia energética.

Una de sus mayores ventajas sobre las otras tecnologías de generación renovable es que es inagotable, ya que se puede hacer uso de ella sin preocuparnos por problemas de abastecimiento, así como que se encuentra disponible las 24 horas del día, los 365 días del año, es decir, no tiene intermitencias, razón por la cual como se ha mencionado anteriormente, las plantas geotérmicas cuentan con altos factores de planta.

México es un país rico en recursos, y la geotermia no es la excepción pues, como se abordó en el capítulo 1, se cuenta con un excelente potencial geotérmico en el país, sin embargo, aún no se logra aprovechar completamente, lo que lo convierte en una alternativa prometedora para la generación eléctrica del país.

El diseño del módulo ORC se realizó pensando totalmente en su operación con geotermia, debido a las razones anteriores y al querer encontrar más alternativas de generación que tuvieran un potencial de aplicación, y que claro se tratase de un diseño mexicano. Como se mencionó en capítulos anteriores, los módulos ORC ya existen en distintas partes del mundo, y han demostrado ser una solución efectiva, ya que, al hacer una selección adecuada del refrigerante, las emisiones son mínimas y se puede diseñar para capacidades grandes o pequeñas, como sea necesario.

Sin embargo, un punto importante a considerar es que la inversión financiera para la creación de pozos geotérmicos es elevada, por lo que sería más adecuado implementar ciclos binarios de mayor capacidad para dicho escenario, para de esta manera aprovechar realmente la fuente de calor. Por esta razón es que se plantea también la posibilidad de aplicarlos para los remanentes energéticos, ya que al ser sistemas compactos son de fácil instalación y pueden ser fácilmente adecuados a las condiciones de la fuente térmica, a la vez que contribuirían en el autoabastecimiento energético de las empresas que deseen implementarlos, así como en la mejora en su huella de impacto ambiental.

Se describieron los procesos termodinámicos involucrados en el diseño del ciclo binario, y se presentaron varias alternativas, donde se optó por desarrollar un ORC simple, esto con el objetivo de reducir los costos de construcción, así como considerar el hecho de que se trata de una primera etapa de diseño, y que como se describió anteriormente, para este tipo de ciclos la eficiencia no mejora considerablemente con otra configuración y el espacio y presupuesto no lo valen en este momento.

Uno de los grandes retos en esta tesis fue el diseño del ciclo binario, y la selección de los equipos a utilizar. En cuanto al expansor se puede determinar que es de suma importancia elegir un expansor que sea adecuado para las condiciones de operación, según lo descrito por Txintxurreta (2021), lo apropiado para la capacidad de diseño del ORC en cuestión sería utilizar un expansor de tornillo, lo que podría ahorrar en costos sacrificando un poco la eficiencia de éste, sin embargo, es imperativo que se garantice la compatibilidad del fluido de trabajo con el diseño del expansor, cosa que cumple la turbina Deprag que se

seleccionó. Es así como se cumple la hipótesis planteada al inicio de esta tesis, pues se confirma que si bien, la turbina no es la opción más recomendable para diseños de baja capacidad, es la más adecuada de acuerdo con su compatibilidad con el sistema, así como por su tamaño, a pesar de que económicamente representa una inversión mayor que una máquina de desplazamiento positivo. Lo mismo sucede con las bombas, pues debe garantizarse que los sellos sean compatibles con el refrigerante, para evitar que existan fugas al momento de operar el sistema y así evitar gastos no contemplados que pudieran presentarse.

Se hizo uso de normativa internacional para el diseño de tuberías, válvulas, bridas y accesorios correspondientes tales como la ASME , y en el caso del diseño de la placa orificio, la norma ISO, donde su efectividad dependerá de su correcta instalación en el sistema, pues hay que tomar en cuenta que la presión de aguas arriba y aguas abajo puede verse considerablemente afectada si no se le deja el espacio adecuado para recuperar la presión y evitar que se generen turbulencias que puedan comprometer a los equipos del sistema.

Otro punto importante que mencionar es que el diseño presentado sólo es una propuesta, pues debe someterse a un análisis de flexibilidad de tuberías que considere las posibles cargas de flexión que se pudiera presentar en el módulo ORC, así como los esfuerzos en las conexiones bridadas y con los equipos, para de esta manera proponer soportería en caso necesario, o modificar el sistema en el escenario donde no cumpla con los criterios de aceptación. El proyecto del ciclo binario presentado en este documento se encuentra en una etapa de prototipo, pues el diseño básico y de detalle queda cubierto en esta tesis, sin embargo, debe considerarse realizar a futuro las pruebas operativas que avalen el correcto funcionamiento de nuestro diseño.

En cuanto al análisis económico, se puede concluir que el módulo ORC presentado sigue siendo algo elevado de costo, siendo una de las razones primordiales el que sólo se esté produciendo una unidad, y no se esté planeando aún una producción en masa. Una de las alternativas para reducir costos significativamente es, como se planteó, el desarrollo de tecnología propia que pudiese cumplir con el objetivo del ciclo binario, no obstante, su desarrollo implicaría más tiempo, aun así, queda como una buena posibilidad.

Considerando el mercado en el cual se pudiera implementar el módulo ORC diseñado en esta tesis, en el país se cuenta con una gran capacidad para aplicación geotérmica, así como con un amplio número de industrias que pudiesen aprovechar la energía que estos módulos compactos generarían con sus desperdicios, logrando así implementar pequeñas redes de generación distribuida que contribuyan un poco con la demanda energética nacional, sin embargo, el competidor directo a vencer sería la energía solar, ya que en los últimos años se ha popularizado más debido a que sus costos han decrementado lo que la convierte en la energía renovable más fácil de aplicar debido a su gran alcance. Sin embargo, como se analizó en el capítulo 4, su contra principal se encuentra en el factor de planta que trae consigo una generación intermitente a lo largo del día, así como el gran espacio que requiere si lo que se busca es contar con grandes capacidades de generación. Es en estos puntos donde se puede sobreponer a los ORC sobre los paneles fotovoltaicos, ya que el tiempo de retorno aumenta sólo en un 50% aproximadamente, y podría disminuir si se reducen costos de producción, y el beneficio sí puede aumentar significativamente en cuanto a generación y ahorros energéticos a largo plazo.

Como trabajo a futuro, se planea hacer los análisis de flexibilidad de tuberías para avalar el diseño propuesto. Posteriormente hacer la adquisición tanto de los equipos, como de la instrumentación, tuberías y todo lo descrito en el capítulo 3, para posteriormente armar el módulo ORC y llevar a cabo las pruebas correspondientes en el campo geotérmico para analizar los resultados y comprobar si se cumplen en realidad los datos teóricos del diseño con la realidad y garantizar el correcto desempeño del módulo ORC.

Para finalizar, sería bueno mencionar que México podría contar con una amplia capacidad de generación distribuida con la implementación de energías renovables, y en este caso en específico con la geotermia, sin embargo, aún falta mucho por hacer para incentivar y desarrollar estas tecnologías, no con el objetivo de verlo como un favor al medio ambiente, por la presión social de querer ser “*eco friendly*”, sino como una manera de aprovechar inteligentemente las fuentes energéticas contenidas en la naturaleza.

2 ANEXOS

2.1 Dimensiones y pesos de tuberías de acero con o sin costura ASME B36.10M

Table 1 Dimensions and Weights of Welded and Seamless Wrought Steel Pipe (Cont'd)

NPS [Note (1)]	Customary Units			Identification [Standard (STD), Extra-Strong (XS), or Double Extra Strong (XXS)]	Schedule No.	DN [Note (2)]	SI Units		
	Outside Diameter, in.	Wall Thickness, in.	Plain End Weight, lb/ft				Outside Diameter, mm	Wall Thickness, mm	Plain End Mass, kg/m
2	2.375	0.065	1.61	...	5	50	60.3	1.65	2.39
2	2.375	0.083	2.03	...	...	50	60.3	2.11	3.03
2	2.375	0.109	2.64	...	10	50	60.3	2.77	3.93
2	2.375	0.125	3.01	...	30	50	60.3	3.18	4.48
2	2.375	0.141	3.37	...	...	50	60.3	3.58	5.01
2	2.375	0.154	3.66	STD	40	50	60.3	3.91	5.44
2	2.375	0.172	4.05	...	...	50	60.3	4.37	6.03
2	2.375	0.188	4.40	...	...	50	60.3	4.78	6.54
2	2.375	0.218	5.03	XS	80	50	60.3	5.54	7.48
2	2.375	0.250	5.68	...	...	50	60.3	6.35	8.45
2	2.375	0.281	6.29	...	...	50	60.3	7.14	9.36
2	2.375	0.344	7.47	...	160	50	60.3	8.74	11.11
2	2.375	0.436	9.04	XXS	...	50	60.3	11.07	13.44
2½	2.875	0.083	2.48	...	5	65	73.0	2.11	3.69
2½	2.875	0.109	3.22	...	...	65	73.0	2.77	4.80
2½	2.875	0.120	3.53	...	10	65	73.0	3.05	5.26
2½	2.875	0.125	3.67	...	...	65	73.0	3.18	5.48
2½	2.875	0.141	4.12	...	...	65	73.0	3.58	6.13
2½	2.875	0.156	4.53	...	...	65	73.0	3.96	6.74
2½	2.875	0.172	4.97	...	...	65	73.0	4.37	7.40
2½	2.875	0.188	5.40	...	30	65	73.0	4.78	8.04
2½	2.875	0.203	5.80	STD	40	65	73.0	5.16	8.63
2½	2.875	0.216	6.14	...	...	65	73.0	5.49	9.14
2½	2.875	0.250	7.02	...	...	65	73.0	6.35	10.44
2½	2.875	0.276	7.67	XS	80	65	73.0	7.01	11.41
2½	2.875	0.375	10.02	...	160	65	73.0	9.53	14.92
2½	2.875	0.552	13.71	XXS	...	65	73.0	14.02	20.39
3	3.500	0.083	3.03	...	5	80	88.9	2.11	4.52
3	3.500	0.109	3.95	...	...	80	88.9	2.77	5.88
3	3.500	0.120	4.34	...	10	80	88.9	3.05	6.46
3	3.500	0.125	4.51	...	...	80	88.9	3.18	6.72
3	3.500	0.141	5.06	...	...	80	88.9	3.58	7.53
3	3.500	0.156	5.58	...	...	80	88.9	3.96	8.30
3	3.500	0.172	6.12	...	...	80	88.9	4.37	9.11
3	3.500	0.188	6.66	...	30	80	88.9	4.78	9.92
3	3.500	0.216	7.58	STD	40	80	88.9	5.49	11.29
3	3.500	0.250	8.69	...	...	80	88.9	6.35	12.93
3	3.500	0.281	9.67	...	...	80	88.9	7.14	14.40
3	3.500	0.300	10.26	XS	80	80	88.9	7.62	15.27
3	3.500	0.438	14.34	...	160	80	88.9	11.13	21.35
3	3.500	0.600	18.60	XXS	...	80	88.9	15.24	27.68
3½	4.000	0.083	3.48	...	5	90	101.6	2.11	5.18
3½	4.000	0.109	4.53	...	...	90	101.6	2.77	6.75
3½	4.000	0.120	4.98	...	10	90	101.6	3.05	7.41
3½	4.000	0.125	5.18	...	...	90	101.6	3.18	7.72
3½	4.000	0.141	5.82	...	...	90	101.6	3.58	8.65
3½	4.000	0.156	6.41	...	...	90	101.6	3.96	9.54
3½	4.000	0.172	7.04	...	...	90	101.6	4.37	10.48
3½	4.000	0.188	7.66	...	30	90	101.6	4.78	11.41

Table 1 Dimensions and Weights of Welded and Seamless Wrought Steel Pipe (Cont'd)

NPS [Note (1)]	Customary Units			Identification [Standard (STD), Extra-Strong (XS), or Double Extra Strong (XXS)]	Schedule No.	DN [Note (2)]	SI Units		
	Outside Diameter, in.	Wall Thickness, in.	Plain End Weight, lb/ft				Outside Diameter, mm	Wall Thickness, mm	Plain End Mass, kg/m
3½	4.000	0.226	9.12	STD	40	90	101.6	5.74	13.57
3½	4.000	0.250	10.02	...	...	90	101.6	6.35	14.92
3½	4.000	0.281	11.17	...	...	90	101.6	7.14	16.63
3½	4.000	0.318	12.52	XS	80	90	101.6	8.08	18.64
4	4.500	0.083	3.92	...	5	100	114.3	2.11	5.84
4	4.500	0.109	5.12	...	...	100	114.3	2.77	7.62
4	4.500	0.120	5.62	...	10	100	114.3	3.05	8.37
4	4.500	0.125	5.85	...	...	100	114.3	3.18	8.71
4	4.500	0.141	6.57	...	...	100	114.3	3.58	9.78
4	4.500	0.156	7.24	...	...	100	114.3	3.96	10.78
4	4.500	0.172	7.96	...	...	100	114.3	4.37	11.85
4	4.500	0.188	8.67	...	30	100	114.3	4.78	12.91
4	4.500	0.203	9.32	...	...	100	114.3	5.16	13.89
4	4.500	0.219	10.02	...	...	100	114.3	5.56	14.91
4	4.500	0.237	10.80	STD	40	100	114.3	6.02	16.08
4	4.500	0.250	11.36	...	...	100	114.3	6.35	16.91
4	4.500	0.281	12.67	...	...	100	114.3	7.14	18.87
4	4.500	0.312	13.97	...	...	100	114.3	7.92	20.78
4	4.500	0.337	15.00	XS	80	100	114.3	8.56	22.32
4	4.500	0.438	19.02	...	120	100	114.3	11.13	28.32
4	4.500	0.531	22.53	...	160	100	114.3	13.49	33.54
4	4.500	0.674	27.57	XXS	...	100	114.3	17.12	41.03
5	5.563	0.083	4.86	...	...	125	141.3	2.11	7.24
5	5.563	0.109	6.36	...	5	125	141.3	2.77	9.46
5	5.563	0.125	7.27	...	...	125	141.3	3.18	10.83
5	5.563	0.134	7.78	...	10	125	141.3	3.40	11.56
5	5.563	0.156	9.02	...	...	125	141.3	3.96	13.41
5	5.563	0.188	10.80	...	...	125	141.3	4.78	16.09
5	5.563	0.219	12.51	...	...	125	141.3	5.56	18.61
5	5.563	0.258	14.63	STD	40	125	141.3	6.55	21.77
5	5.563	0.281	15.87	...	...	125	141.3	7.14	23.62
5	5.563	0.312	17.51	...	...	125	141.3	7.92	26.05
5	5.563	0.344	19.19	...	...	125	141.3	8.74	28.57
5	5.563	0.375	20.80	XS	80	125	141.3	9.53	30.97
5	5.563	0.500	27.06	...	120	125	141.3	12.70	40.28
5	5.563	0.625	32.99	...	160	125	141.3	15.88	49.12
5	5.563	0.750	38.59	XXS	...	125	141.3	19.05	57.43
6	6.625	0.083	5.80	...	...	150	168.3	2.11	8.65
6	6.625	0.109	7.59	...	5	150	168.3	2.77	11.31
6	6.625	0.125	8.69	...	...	150	168.3	3.18	12.95
6	6.625	0.134	9.30	...	10	150	168.3	3.40	13.83
6	6.625	0.141	9.77	...	...	150	168.3	3.58	14.54
6	6.625	0.156	10.79	...	...	150	168.3	3.96	16.05
6	6.625	0.172	11.87	...	...	150	168.3	4.37	17.67
6	6.625	0.188	12.94	...	...	150	168.3	4.78	19.28
6	6.625	0.203	13.94	...	...	150	168.3	5.16	20.76
6	6.625	0.219	15.00	...	...	150	168.3	5.56	22.31
6	6.625	0.250	17.04	...	...	150	168.3	6.35	25.36
6	6.625	0.280	18.99	STD	40	150	168.3	7.11	28.26

Table 1 Dimensions and Weights of Welded and Seamless Wrought Steel Pipe (Cont'd)

NPS [Note (1)]	Customary Units			Identification [Standard (STD), Extra-Strong (XS), or Double Extra Strong (XXS)]	Schedule No.	DN [Note (2)]	SI Units		
	Outside Diameter, in.	Wall Thickness, in.	Plain End Weight, lb/ft				Outside Diameter, mm	Wall Thickness, mm	Plain End Mass, kg/m
6	6.625	0.312	21.06	...	...	150	168.3	7.92	31.33
6	6.625	0.344	23.10	...	...	150	168.3	8.74	34.39
6	6.625	0.375	25.05	...	...	150	168.3	9.53	37.31
6	6.625	0.432	28.60	XS	80	150	168.3	10.97	42.56
6	6.625	0.500	32.74	...	...	150	168.3	12.70	48.73
6	6.625	0.562	36.43	...	120	150	168.3	14.27	54.21
6	6.625	0.625	40.09	...	...	150	168.3	15.88	59.69
6	6.625	0.719	45.39	...	160	150	168.3	18.26	67.57
6	6.625	0.750	47.10	...	...	150	168.3	19.05	70.12
6	6.625	0.864	53.21	XXS	...	150	168.3	21.95	79.22
6	6.625	0.875	53.78	...	...	150	168.3	22.23	80.08
8	8.625	0.109	9.92	...	5	200	219.1	2.77	14.78
8	8.625	0.125	11.36	...	...	200	219.1	3.18	16.93
8	8.625	0.148	13.41	...	10	200	219.1	3.76	19.97
8	8.625	0.156	14.12	...	...	200	219.1	3.96	21.01
8	8.625	0.188	16.96	...	...	200	219.1	4.78	25.26
8	8.625	0.203	18.28	...	...	200	219.1	5.16	27.22
8	8.625	0.219	19.68	...	...	200	219.1	5.56	29.28
8	8.625	0.250	22.38	...	20	200	219.1	6.35	33.32
8	8.625	0.277	24.72	...	30	200	219.1	7.04	36.82
8	8.625	0.312	27.73	...	...	200	219.1	7.92	41.25
8	8.625	0.322	28.58	STD	40	200	219.1	8.18	42.55
8	8.625	0.344	30.45	...	...	200	219.1	8.74	45.34
8	8.625	0.375	33.07	...	...	200	219.1	9.53	49.25
8	8.625	0.406	35.67	...	60	200	219.1	10.31	53.09
8	8.625	0.438	38.33	...	...	200	219.1	11.13	57.08
8	8.625	0.500	43.43	XS	80	200	219.1	12.70	64.64
8	8.625	0.562	48.44	...	...	200	219.1	14.27	72.08
8	8.625	0.594	51.00	...	100	200	219.1	15.09	75.92
8	8.625	0.625	53.45	...	...	200	219.1	15.88	79.59
8	8.625	0.719	60.77	...	120	200	219.1	18.26	90.44
8	8.625	0.750	63.14	...	...	200	219.1	19.05	93.98
8	8.625	0.812	67.82	...	140	200	219.1	20.62	100.93
8	8.625	0.875	72.49	XXS	...	200	219.1	22.23	107.93
8	8.625	0.906	74.76	...	160	200	219.1	23.01	111.27
8	8.625	1.000	81.51	...	...	200	219.1	25.40	121.33

2.2 Máximo esfuerzo permisible SE para acero SA-106-B

Maximum Allowable Stress Values in Tension, ksi, for Metal Temperature, °F, Not Exceeding											
-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	Grade	Spec. No.
Seamless Pipe and Tube											
13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	12.5	10.7	9.0	A	A 53
17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	15.6	13.0	10.8	B	
13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	12.5	10.7	9.0	A	A 106
17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	15.6	13.0	10.8	B	
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.8	18.3	14.8	12.0	C	

2.3 Valores de coeficiente y en ecuación de espesor de tubería

Table 104.1.2(A) Values of y

Temperature, °F	900 and Below	950	1,000	1,050	1,100	1,150	1,200	1,250 and Above
Temperature, °C	482 and Below	510	538	566	593	621	649	677 and Above
Ferritic steels	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Austenitic steels	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7
Nickel alloys UNS Nos. N06617, N08800, N08810, N08825	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7

2.4 Tablas de esfuerzo de cedencia para aceros ASTM A105 t A216-WCB con respecto a la temperatura de diseño.

TABLE Y-1 (CONT'D)
YIELD STRENGTH VALUES S_y FOR FERROUS AND NONFERROUS MATERIALS

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec No.	Type/Grade	Alloy Designation/ UNS No.	Class/Condition/ Temper
Ferrous Materials (Cont'd)						
1	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-2	P295GH	...	...
2	Carbon steel	Bar	SA-675	65	...	...
3	Carbon steel	Castings	SA-352	LCB	J03003	...
4	Carbon steel	Plate	SA-515	65	K02800	...
5	Carbon steel	Plate	SA-516	65	K02403	...
6	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CB65	K02800	...
7	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CC65	K02403	...
8	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	B65	K02800	...
9	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	C65	K02403	...
10	Carbon steel	Sheet	SA-414	E	K02704	...
11	Carbon steel	Plate	SA-662	B	K02203	...
12	Carbon steel	Plate	SA/GB 6654	16MnR	...	...
13	Carbon steel	Plate	SA-537	...	K12437	1
14	Carbon steel	Wld. pipe	SA-691	CMSH-70	K12437	...
15	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-2	P295GH	...	...
16	Carbon steel	Plate	SA/AS 1548	7-460	...	...
17	Carbon steel	Plate	SA/AS 1548	7-460	...	...
18	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-2	P295GH	...	...
19	Carbon steel	Plate	SA/GB 6654	16MnR	...	...
20	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-2	P295GH	...	...
21	Carbon steel	Plate	SA/AS 1548	7-460	...	...
22	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-2	P295GH	...	...
23	Carbon steel	Plate	SA/AS 1548	7-460	...	...
24	Carbon steel	Plate	SA/GB 6654	16MnR	...	...
25	Carbon steel	Plate	SA-455	...	K03300	...
26	Carbon steel	Bar	SA-675	70	...	...
27	Carbon steel	Forgings	SA-105	...	K03504	...
28	Carbon steel	Forgings	SA-181	...	K03502	70
29	Carbon steel	Castings	SA-216	WCB	J03002	...
30	Carbon steel	Forgings	SA-266	2	K03506	...
31	Carbon steel	Forgings	SA-266	4	K03017	...
32	Carbon steel	Forgings	SA-350	LF2	K03011	...

TABLE Y-1 (CONT'D)
YIELD STRENGTH VALUES S_y FOR FERROUS AND NONFERROUS MATERIALS

Line No.	Yield Strength, MPa (Multiply by 1000 to Obtain kPa), for Metal Temperature, °C, Not Exceeding									
	-30 to 40	65	100	125	150	175	200	225	250	275
Ferrous Materials (Cont'd)										
1	234	221	214	211	207	204	201	197	193	188
2	224	210	205	201	198	196	192	189	184	180
3	241	227	220	217	214	210	207	203	198	194
4	241	227	220	217	214	210	207	203	198	194
5	241	227	220	217	214	210	207	203	198	194
6	241	227	220	217	214	210	207	203	198	194
7	241	227	220	217	214	210	207	203	198	194
8	241	227	220	217	214	210	207	203	198	194
9	241	227	220	217	214	210	207	203	198	194
10	262	246	239	235	232	228	225	221	216	210
11	276	259	251	248	244	240	237	232	227	221
12	275	259	251	247	243	240	236	...	224	...
13	310	292	283	279	274	270	266	261	255	249
14	310	292	283	279	274	270	266	261	255	249
15	259	243	236	232	229	225	221	217	213	208
16	265	253	242	238	235	232	228	223	219	213
17	276	263	251	247	244	241	237	232	227	221
18	286	269	261	257	253	249	246	241	235	229
19	285	268	260	256	252	248	244	...	232	...
20	290	273	264	260	256	253	248	243	238	232
21	296	283	270	265	262	258	254	249	244	238
22	296	279	271	266	262	258	254	249	244	238
23	303	289	276	271	268	264	260	255	250	244
24	305	287	278	274	270	266	261	...	248	...
25	241	227	220	217	214	210	207	203	198	194
26	241	227	220	217	214	210	207	203	198	194
27	248	233	227	223	219	216	213	209	204	199
28	248	233	227	223	219	216	213	209	204	199
29	248	233	227	223	219	216	213	209	204	199
30	248	233	227	223	219	216	213	209	204	199
31	248	233	227	223	219	216	213	209	204	199
32	248	233	227	223	219	216	213	209	204	199

2.5 Tablas de resistencia a la tracción para aceros ASTM A105 y A216-WCB.

TABLE U (CONT'D)
TENSILE STRENGTH VALUES S_u FOR FERROUS AND NONFERROUS MATERIALS

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec No.	Type/Grade	Alloy Designation/ UNS No.	Class/Condition/ Temper	Size/Thickness, mm	Min. Tensile Strength, MPa
Ferrous Materials (Cont'd)								
1	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CB65	K02800	...	...	450
2	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CC65	K02403	...	...	450
3	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	B65	K02800	...	...	450
4	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	C65	K02403	...	...	450
5	Carbon steel	Sheet	SA-414	E	K02704	...	...	450
6	Carbon steel	Plate	SA-662	B	K02203	...	...	450
7	Carbon steel	Plate	SA/GB 6654	16MnR	...	...	100 < t ≤ 120	450
8	Carbon steel	Plate	SA-537	...	K12437	1	64 < t ≤ 100	450
9	Carbon steel	Wld. pipe	SA-691	CMSH-70	K12437	...	64 < t ≤ 100	450
10	Carbon steel	Plate	SA/AS 1548	7-460	...	...	≤ 150	460
11	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-2	P295GH	...	...	≤ 100	460
12	Carbon steel	Plate	SA/GB 6654	16MnR	...	...	60 < t ≤ 100	460
13	Carbon steel	Plate	SA/GB 6654	16MnR	...	...	36 < t ≤ 60	470
14	Carbon steel	Plate	SA-455	...	K03300	...	15 < t ≤ 19	485
15	Carbon steel	Bar	SA-675	70	...	...	...	485
16	Carbon steel	Forgings	SA-105	...	K03504	...	...	485
17	Carbon steel	Forgings	SA-181	...	K03502	70	...	485
18	Carbon steel	Castings	SA-216	WCB	J03002	...	...	485
19	Carbon steel	Forgings	SA-266	2	K03506	...	...	485
20	Carbon steel	Forgings	SA-266	4	K03017	...	...	485
21	Carbon steel	Forgings	SA-350	LF2	K03011	...	...	485

TABLE U (CONT'D)
TENSILE STRENGTH VALUES S_u FOR FERROUS AND NONFERROUS MATERIALS

Line No.	Tensile Strength, MPa (Multiply by 1000 to Obtain kPa), for Metal Temperature, °C, Not Exceeding														
	-30 to 40	100	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525
	Ferrous Materials (Cont'd)														
1	448	448	448	448	448	448	448	448	448	442	414	381	345	308	274
2	448	448	448	448	448	448	448	448	448	442	414	381	345	308	274
3	448	448	448	448	448	448	448	448	448	442	414	381	345	308	274
4	448	448	448	448	448	448	448	448	448	442	414	381	345	308	274
5	448	448	448	448	448	448	448	448	448	442	414	381	345	308	274
6	448	448	448	448	448	448	448	448	448	442	414	381	345	308	274
7	450	450	450	450	450	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
8	448	448	448	448	448	448	448	448	448	442	414	381	345	308	274
9	448	448	448	448	448	448	448	448	448	442	414	381	345	308	274
10	458	458	458	458	458	458	458	458	458	452	424	389	353	315	281
11	458	458	458	458	458	458	458	458	458	452	424	389	353	315	281
12	460	460	460	460	460	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
13	470	470	470	470	470	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
14	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296
15	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296
16	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296
17	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296
18	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296
19	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296
20	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296
21	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296

2.6 Tabla de tope de presión p_c por clase de brida con respecto a la presión para materiales SA-105, tomado de ASME B16.5.

Table A-1 Rating Ceiling Pressure – p_c , bar

Temperature °C	Class						
	150	300	400	600	900	1500	2500
29 to 38	20.0	51.7	68.9	103.4	155.1	258.6	430.9
50	19.5	51.7	68.9	103.4	155.1	258.6	430.9
100	17.7	51.5	68.7	103.0	154.6	257.6	429.4
150	15.8	50.3	66.8	100.3	150.6	250.8	418.2
200	13.8	48.6	64.8	97.2	145.8	243.4	405.4
250	12.1	46.3	61.7	92.7	139.0	231.8	386.2
300	10.2	42.9	57.0	85.7	128.6	214.4	357.1
325	9.3	41.4	55.0	82.6	124.0	206.6	344.3
350	8.4	40.3	53.6	80.4	120.7	201.1	335.3
375	7.4	38.9	51.6	77.6	116.5	194.1	323.2
400	6.5	36.5	48.9	73.3	109.8	183.1	304.9
425	5.5	35.2	46.5	70.0	105.1	175.1	291.6
450	4.6	33.7	45.1	67.7	101.4	169.0	281.8
475	3.7	31.7	42.3	63.4	95.1	158.2	263.9
500	2.8	28.2	37.6	56.5	84.7	140.9	235.0
525	1.9	25.8	34.4	51.6	77.4	129.0	214.9
538	1.4	25.2	33.4	50.0	75.2	125.5	208.9
550	[Note (1)]	25.0	33.3	49.8	74.8	124.9	208.0
575	[Note (1)]	24.0	31.9	47.9	71.8	119.7	199.5
600	[Note (1)]	21.6	28.6	42.9	64.2	107.0	178.5
625	[Note (1)]	18.3	24.3	36.6	54.9	91.2	152.0
650	[Note (1)]	14.1	18.9	28.1	42.5	70.7	117.7
675	[Note (1)]	12.4	16.9	25.2	37.6	62.7	104.5
700	[Note (1)]	10.1	13.4	20.0	29.8	49.7	83.0
725	[Note (1)]	7.9	10.5	15.4	23.2	38.6	64.4
750	[Note (1)]	5.9	7.9	11.7	17.6	29.6	49.1
775	[Note (1)]	4.6	6.2	9.0	13.7	22.8	38.0
800	[Note (1)]	3.5	4.8	7.0	10.5	17.4	29.2
816	[Note (1)]	2.8	3.8	5.9	8.6	14.1	23.8

NOTE:

(1) Ratings for flanges and flanged fittings terminate at 538°C (1,000°F).

2.7 Tabla de tope de presión p_{ca} por clase de válvula con respecto a la presión para materiales SA-105, tomada de ASME B16.34

**Table B-3 Pressure Rating Ceiling Values
A – Standard Class**

Temperature, °C	Working Pressures by Class, bar						
	150	300	600	900	1500	2500	4500
-29 to 38	20.0	51.7	103.4	155.1	258.6	430.9	775.7
50	19.5	51.7	103.4	155.1	258.6	430.9	775.7
100	17.7	51.5	103.0	154.6	257.6	429.4	773.0
150	15.8	50.3	100.3	150.6	250.8	418.2	752.8
200	13.8	48.6	97.2	145.8	243.4	405.4	729.8
250	12.1	46.3	92.7	139.0	231.8	386.2	694.8
300	10.2	42.9	85.7	128.6	214.4	357.1	642.6
325	9.3	41.4	82.6	124.0	206.6	344.3	619.6
350	8.4	40.3	80.4	120.7	201.1	335.3	603.3
375	7.4	38.9	77.6	116.5	194.1	323.2	581.8
400	6.5	36.5	73.3	109.8	183.1	304.9	548.5
425	5.5	35.2	70.0	105.1	175.1	291.6	524.7
450	4.6	33.7	67.7	101.4	169.0	281.8	507.0
475	3.7	31.7	63.4	95.1	158.2	263.9	474.8
500	2.8	28.2	56.5	84.7	140.9	235.0	423.0
525	1.9	25.8	51.6	77.4	129.0	214.9	386.7
538	1.4	25.2	50.0	75.2	125.5	208.9	375.8
550	1.4	25.0	49.8	74.8	124.9	208.0	374.2
575	1.4	24.0	47.9	71.8	119.7	199.5	359.1
600	1.4	21.6	42.9	64.2	107.0	178.5	321.4
625	1.4	18.3	36.6	54.9	91.2	152.0	273.8
650	1.4	14.1	28.1	42.5	70.7	117.7	211.7
675	1.4	12.4	25.2	37.6	62.7	104.5	187.9
700	1.4	10.1	20.0	29.8	49.7	83.0	149.4
725	1.4	7.9	15.4	23.2	38.6	64.4	115.8
750	1.4	5.9	11.7	17.6	29.6	49.1	88.2
775	1.4	4.6	9.0	13.7	22.8	38.0	68.4
800	1.2	3.5	7.0	10.5	17.4	29.2	52.6
816	1.0	2.8	5.9	8.6	14.1	23.8	42.7

3.1 Tabla para determinar el Coeficiente de descarga de acuerdo con D, Re y β . Extraído de ISO 5167-2.

Table A.2 — Orifice plate with D and $D/2$ tapings — Discharge coefficient, C , for $D \geq 71,12$ mm

Diameter ratio β	Discharge coefficient, C , for Re_D equal to											
	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
0,10	0,600 3	0,598 7	0,597 7	0,597 3	0,596 9	0,596 7	0,596 6	0,596 3	0,596 2	0,596 1	0,596 1	0,596 0
0,12	0,601 0	0,599 1	0,597 9	0,597 5	0,597 1	0,596 9	0,596 7	0,596 4	0,596 2	0,596 1	0,596 1	0,596 1
0,14	0,601 6	0,599 5	0,598 2	0,597 7	0,597 2	0,597 0	0,596 8	0,596 5	0,596 3	0,596 2	0,596 1	0,596 1
0,16	0,602 3	0,600 0	0,598 5	0,598 0	0,597 4	0,597 2	0,597 0	0,596 6	0,596 4	0,596 2	0,596 2	0,596 2
0,18	0,602 9	0,600 4	0,598 9	0,598 2	0,597 7	0,597 4	0,597 1	0,596 7	0,596 5	0,596 3	0,596 3	0,596 3
0,20	0,603 7	0,600 9	0,599 2	0,598 5	0,597 9	0,597 6	0,597 4	0,596 9	0,596 6	0,596 4	0,596 4	0,596 4
0,22	0,604 4	0,601 5	0,599 6	0,598 9	0,598 2	0,597 9	0,597 6	0,597 1	0,596 8	0,596 6	0,596 5	0,596 5
0,24	0,605 3	0,602 1	0,600 1	0,599 3	0,598 5	0,598 2	0,597 9	0,597 3	0,597 0	0,596 7	0,596 7	0,596 6
0,26	0,606 2	0,602 7	0,600 6	0,599 7	0,598 9	0,598 5	0,598 2	0,597 5	0,597 2	0,596 9	0,596 9	0,596 8
0,28	0,607 2	0,603 4	0,601 1	0,600 2	0,599 3	0,598 9	0,598 5	0,597 8	0,597 5	0,597 2	0,597 1	0,597 0
0,30	0,608 2	0,604 2	0,601 7	0,600 7	0,599 8	0,599 3	0,598 9	0,598 2	0,597 8	0,597 4	0,597 3	0,597 3
0,32	0,609 4	0,605 1	0,602 4	0,601 3	0,600 3	0,599 8	0,599 4	0,598 6	0,598 1	0,597 7	0,597 6	0,597 5
0,34	0,610 7	0,606 0	0,603 1	0,602 0	0,600 9	0,600 4	0,599 9	0,599 0	0,598 5	0,598 1	0,597 9	0,597 8
0,36	0,612 1	0,607 1	0,604 0	0,602 7	0,601 6	0,601 0	0,600 5	0,599 5	0,598 9	0,598 4	0,598 3	0,598 1
0,38	0,613 7	0,608 2	0,604 9	0,603 5	0,602 3	0,601 6	0,601 1	0,600 0	0,599 4	0,598 8	0,598 6	0,598 5
0,40	0,615 3	0,609 5	0,605 9	0,604 4	0,603 1	0,602 4	0,601 8	0,600 6	0,599 9	0,599 3	0,599 1	0,598 9
0,42	0,617 2	0,610 9	0,607 0	0,605 4	0,603 9	0,603 2	0,602 5	0,601 2	0,600 5	0,599 8	0,599 5	0,599 3
0,44	0,619 2	0,612 4	0,608 2	0,606 5	0,604 9	0,604 1	0,603 4	0,601 9	0,601 1	0,600 3	0,600 0	0,599 7
0,46	0,621 4	0,614 0	0,609 4	0,607 6	0,605 9	0,605 0	0,604 2	0,602 7	0,601 7	0,600 8	0,600 5	0,600 2
0,48	0,623 8	0,615 7	0,610 8	0,608 8	0,607 0	0,606 0	0,605 2	0,603 5	0,602 4	0,601 4	0,601 0	0,600 6
0,50	0,626 4	0,617 6	0,612 3	0,610 1	0,608 1	0,607 1	0,606 2	0,604 3	0,603 1	0,602 0	0,601 6	0,601 1
0,51	0,627 8	0,618 6	0,613 1	0,610 8	0,608 7	0,607 6	0,606 7	0,604 7	0,603 5	0,602 3	0,601 9	0,601 4
0,52	0,629 2	0,619 7	0,613 9	0,611 5	0,609 3	0,608 2	0,607 2	0,605 2	0,603 9	0,602 7	0,602 1	0,601 6
0,53	0,630 7	0,620 7	0,614 7	0,612 3	0,610 0	0,608 8	0,607 8	0,605 6	0,604 3	0,603 0	0,602 4	0,601 9
0,54	0,632 2	0,621 8	0,615 5	0,613 0	0,610 6	0,609 4	0,608 3	0,606 1	0,604 7	0,603 3	0,602 7	0,602 1
0,55	0,633 7	0,622 9	0,616 4	0,613 8	0,611 3	0,610 0	0,608 9	0,606 5	0,605 0	0,603 6	0,603 0	0,602 4
0,56	—	0,624 1	0,617 3	0,614 5	0,611 9	0,610 6	0,609 5	0,607 0	0,605 4	0,603 9	0,603 2	0,602 6
0,57	—	0,625 3	0,618 2	0,615 3	0,612 6	0,611 2	0,610 0	0,607 5	0,605 8	0,604 2	0,603 5	0,602 8
0,58	—	0,626 5	0,619 1	0,616 1	0,613 3	0,611 9	0,610 6	0,607 9	0,606 2	0,604 5	0,603 8	0,603 0
0,59	—	0,627 7	0,620 0	0,616 9	0,614 0	0,612 5	0,611 2	0,608 4	0,606 6	0,604 8	0,604 0	0,603 2
0,60	—	0,629 0	0,621 0	0,617 7	0,614 7	0,613 1	0,611 8	0,608 8	0,607 0	0,605 1	0,604 2	0,603 4

12:00

3.2 Tabla para las distancias requeridas para la instalación de la placa orificio. Extraído de ISO 5167-2.

Table 3 — Required straight lengths between orifice plates and fittings without flow conditioners

Values expressed as multiples of internal diameter, D

Diam- eter ratio β	Upstream (inlet) side of orifice plate														Down- stream (outlet) side of the orifice plate											
	Single 90° bend Two 90° bends in any plane ($S > 30D$) ^a		Two 90° bends in the same plane: S-configur- ation ($30D \geq S > 10D$) ^a		Two 90° bends in the same plane: S-configur- ation ($10D \geq S$) ^a		Two 90° bends in perpen- dicular planes ($30D \geq S \geq 5D$) ^a		Two 90° bends in perpen- dicular planes ($5D > S$) ^{a, b}		Single 90° tee with or without an extension Mitre 90° bend		Single 45° bend Two 45° bends in the same plane: S-configur- ation ($S \geq 2D$) ^a		Concentric reducer 2D to D over a length of 1,5D to 3D		Concentric expander 0,5D to D over a length of D to 2D		Full bore ball valve or gate valve fully open		Abrupt symmetrical reduction		Ther- mometer pocket or well ^c of diameter $\leq 0,03D$ ^d		Fittings (columns 2 to 11) and the densi- tometer pocket	
1	2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14	
—	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f
$\leq 0,20$	6	3	10	9	10	9	19	18	34	17	3	9	7	9	5	9	6	9	12	6	30	15	5	3	4	2
0,40	16	3	10	9	10	9	44	18	50	25	9	3	30	9	5	9	12	8	12	6	30	15	5	3	6	3
0,50	22	9	18	10	22	10	44	18	75	34	19	9	30	18	8	5	20	9	12	6	30	15	5	3	6	3
0,60	42	13	30	18	42	18	44	18	65 ^h	25	29	18	30	18	9	5	26	11	14	7	30	15	5	3	7	3,5
0,67	44	20	44	18	44	20	44	20	60	18	36	18	44	18	12	6	28	14	18	9	30	15	5	3	7	3,5
0,75	44	20	44	18	44	22	44	20	75	18	44	18	44	18	13	8	36	18	24	12	30	15	5	3	8	4

NOTE 1 The minimum straight lengths required are the lengths between various fittings located upstream or downstream of the orifice plate and the orifice plate itself. Straight lengths shall be measured from the downstream end of the curved portion of the nearest (or only) bend or of the tee or the downstream end of the curved or conical portion of the reducer or the expander.

NOTE 2 Most of the bends on which the lengths in this table are based had a radius of curvature equal to 1,5D.

^a S is the separation between the two bends measured from the downstream end of the curved portion of the upstream bend to the upstream end of the curved portion of the downstream bend.

^b This is not a good upstream installation; a flow conditioner should be used where possible.

^c The installation of thermometer pockets or wells will not alter the required minimum upstream straight lengths for the other fittings.

^d A thermometer pocket or well of diameter between 0,03D and 0,13D may be installed provided that the values in Columns A and B are increased to 20 and 10 respectively. Such an installation is not, however, recommended.

^e Column A for each fitting gives lengths corresponding to "zero additional uncertainty" values (see 6.2.3).

^f Column B for each fitting gives lengths corresponding to "0,5 % additional uncertainty" values (see 6.2.4).

^g The straight length in Column A gives zero additional uncertainty; data are not available for shorter straight lengths which could be used to give the required straight lengths for Column B.

^h 95D is required for $Re_D > 2 \times 10^6$ if $S < 2D$.

4.1 Análisis económico en Excel

Excel interface showing the 'Inicio' ribbon and a spreadsheet with the following data:

30	Factor del Valor Presente	$FVP = 1 / ((1+i)^t)$	Considerando i=10%		Costos en dólares/KW															
31	años, perfil de inversión	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
32	Línea del tiempo actual	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
33	FVP	1	0.909090909	0.826446281	0.751314801	0.683013455	0.620921833	0.56447393	0.513158118	0.46650738	0.424097618	0.38543289	0.350493899	0.318630818	0.28966438	0.263331254	0.239392049	0.217629136		
34	Proyecto de 100 kW																			
35	Inversión (USD)	\$	144,577.00																	
36	O&M (USD)	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	
37	Inv+O&M	\$	354,081.00	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	
38	Valor presente	\$	354,081.00	\$	13,700.64	\$	12,455.12	\$	11,322.84	\$	10,293.49	\$	9,357.72	\$	8,507.02	\$	7,733.65	\$	7,030.59	
39	O&M VP	\$	13,700.64	\$	12,455.12	\$	11,322.84	\$	10,293.49	\$	9,357.72	\$	8,507.02	\$	7,733.65	\$	7,030.59	\$	6,391.45	
40																				
41	Energía generada anualmente (kWh)	696201	632910	575372.7273	523066.1157	475514.6506	432286.046	392987.3146	357261.1951	324782.9046	295257.186	268415.6236	244014.2033	221831.0939	201664.6308	183331.4826	166664.9842	151513.622		
42	Costo unitario por inversión (USD/kWh)	\$	0.06																	
43	Costo unitario de O&M	\$	0.02																	
44	Costo unitario de generación (USD/kWh)	\$	0.08																	
45																				
46	Ingresos (USD)		47,264.60	48682.538	50143.01414	51647.30456	53196.7237	54792.62541	56436.40417	58129.4963	59873.38119	61669.58262	63519.6701	65425.26021	67388.01801	69409.65855	71491.94831	73636.70676		
47	Ganancia (USD)		33,563.96	36,227.41	38,820.17	41,353.81	43,839.00	46,285.61	48,702.75	51,098.90	53,481.93	55,854.48	58,217.48	60,572.27	62,922.57	65,269.47	67,613.07	69,953.47		
48	Inversión + Ganancia	\$	-354,081.00	\$	-320,517.04	\$	-284,289.62	\$	-245,489.45	\$	-204,115.63	\$	-160,276.63	\$	-113,991.02	\$	-65,288.27	\$	-14,189.37	
49																				
50	Tiempo de recuperación	9 años																		

Excel interface showing the 'Inicio' ribbon and a spreadsheet with the following data:

30	Factor del Valor Presente	$FVP = 1 / ((1+i)^t)$	Considerando i=10%		Costos en dólares/KW															
31	años, perfil de inversión	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
32	Línea del tiempo actual	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
33	FVP	1	0.909090909	0.826446281	0.751314801	0.683013455	0.620921833	0.56447393	0.513158118	0.46650738	0.424097618	0.38543289	0.350493899	0.318630818	0.28966438	0.263331254	0.239392049	0.217629136		
34	Proyecto de 100 kW																			
35	Inversión (USD)	\$	144,577.00																	
36	O&M (USD)	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	
37	Inv+O&M	\$	354,081.00	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	\$	15,070.70	
38	Valor presente	\$	354,081.00	\$	13,700.64	\$	12,455.12	\$	11,322.84	\$	10,293.49	\$	9,357.72	\$	8,507.02	\$	7,733.65	\$	7,030.59	
39	O&M VP	\$	13,700.64	\$	12,455.12	\$	11,322.84	\$	10,293.49	\$	9,357.72	\$	8,507.02	\$	7,733.65	\$	7,030.59	\$	6,391.45	
40																				
41	Energía generada anualmente (kWh)	696201	632910	575372.7273	523066.1157	475514.6506	432286.046	392987.3146	357261.1951	324782.9046	295257.186	268415.6236	244014.2033	221831.0939	201664.6308	183331.4826	166664.9842	151513.622		
42	Costo unitario por inversión (USD/kWh)	\$	0.06																	
43	Costo unitario de O&M	\$	0.02																	
44	Costo unitario de generación (USD/kWh)	\$	0.08																	
45																				
46	Ingresos (USD)		47,264.60	48682.538	50143.01414	51647.30456	53196.7237	54792.62541	56436.40417	58129.4963	59873.38119	61669.58262	63519.6701	65425.26021	67388.01801	69409.65855	71491.94831	73636.70676		
47	Ganancia (USD)		33,563.96	36,227.41	38,820.17	41,353.81	43,839.00	46,285.61	48,702.75	51,098.90	53,481.93	55,854.48	58,217.48	60,572.27	62,922.57	65,269.47	67,613.07	69,953.47		
48	Inversión + Ganancia	\$	-354,081.00	\$	-320,517.04	\$	-284,289.62	\$	-245,489.45	\$	-204,115.63	\$	-160,276.63	\$	-113,991.02	\$	-65,288.27	\$	-14,189.37	
49																				
50	Tiempo de recuperación	9 años																		