



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Doctorado en Ingeniería

**Eficiencia de un ciclo Rankine orgánico utilizando energía solar en la etapa de
regeneración en plantas de hasta 1 kW**

Opción de titulación

Tesis

Parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

Presentador:

MC. Raúl Alejandro Martínez Sánchez

Asesor principal

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

SINODALES

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

Presidente

Dr. José Manuel Alvarez Alvarado

secretario

Dra. Erica Lorenzo Garcia

Vocal

Dr. Gerardo Israel Pérez Soto

sustituto

Dr. José Román García Martínez

sustituto

Centro Universitario

Querétaro, QRO

México.

Abril 2024

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

La culminación de este trabajo marca el fin de una larga etapa de mi vida, donde el objetivo nunca fue alcanzar la excelencia académica que supone obtener un título de esta envergadura. De alguna manera siento que es el punto final de una extensa trayectoria estudiantil que se ha dilatado en la medida que las oportunidades de estudio se han ido presentando. A partir de ahora es un momento de transición donde espero compartir e implementar los conocimientos adquiridos. En el momento de escribir esto recuerdo un pensamiento que tenía en el pie de firma de mi correo cuando estudiaba para convertirme en ingeniero; "La confianza en si mismo es el primer secreto del éxito".

Agradecimientos

Llegar al momento de los agradecimientos siempre es un poco injusto, porque de una forma u otra las personas que forman parte de tu familia, amigos, pareja e inclusive las personas que circulan de paso por mi vida tienen una cuota de mérito para que este estudio haya llegado a buen puerto; así que creo que los agradecimientos es mejor hacerlos de forma convencional.

Primero que nada agradecer a mis padres que siempre me brindaron la guía y confianza necesaria para convertirme primero en una buena persona y luego en un profesional. A mi hija, debido a que culminar estos estudios suponen el mejor ejemplo que le puedo brindar. A Erika y Antonio que fueron las primeras personas en brindarme tutoría para ingresar a un área del conocimiento desconocida para mi. Al Dr. Juvenal y Dr. José Manuel porque confiaron en mi capacidad de llevar este proyecto adelante. A mi familia que me ha expresado la satisfacción que sienten por verme en este punto.

A mis amigos de Ecuador que cuando se presentó la oportunidad de venir a México me apoyaron y me brindaron los mejores consejos. A mis amigos de la infancia y a los que andan desperdigados por todas partes del mundo por alentarme siempre. A mi pareja que compartió y resistió los momentos más difíciles de este proceso; y siempre, siempre, siempre confió en mi y me brindó su apoyo incondicional y que a día de hoy es motor fundamental para culminar esta etapa.

A mis amigos de curso, a los amigos que he conocido en México, a todos les digo; muchas gracias!

Resumen

En un ciclo rankine orgánico (ORC), el estudio de la eficiencia térmica es importante para comprender el desempeño general del ciclo termodinámico. La elección de bombas de alta presión y turbina con características específicas, aparejado al tipo de fluido de trabajo orgánico escogido permiten utilizar fuentes de energía de baja temperatura; como es el caso de la radiación solar. En un ORC convergen diferentes configuraciones como puede ser el modo de operación simple, regeneración, sistemas con recalentamiento o combinado. En función del régimen de trabajo la eficiencia térmica puede variar. Esta investigación tiene como objetivo implementar un sistema de captación solar en una etapa de regeneración para mejorar el desempeño de la planta ORC. Los resultados obtenidos establecen un aumento de la eficiencia térmica en modo simple de 35.21 % hasta un 65.7 % en modo regeneración con el sistema de captación solar acoplado. De esta forma se reduce el consumo de energía y se podría dejar de emitir a la atmósfera hasta 1226.4 toneladas de CO_2 con el respectivo impacto ambiental.

Abstract

In an organic rankine cycle (ORC), the study of the efficiencies of the installed equipment is important to understand the overall performance of the thermodynamic cycle. The appropriate selection of the devices on the one hand and the organic working fluid that allows the use of low temperature energy sources such as solar radiation establishes the basis for adequate plant performance. Different configurations converge in an ORC, such as simple operation mode, regeneration, systems with reheating or combined. Depending on the work regime, the thermal efficiency may vary. This research aims to implement a solar collection system in a regeneration stage to improve the performance of the ORC plant. The results obtained establish an increase in thermal efficiency in simple mode from 35.21 % to 65.7 % in regeneration mode with the solar collection system coupled. In this way, energy consumption is reduced and up to 1226.4 tons of CO_2 could be stopped from being emitted into the atmosphere with the respective environmental impact.

Índice general

Agradecimientos

Resumen	I
---------	---

Abstract	III
----------	-----

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Antecedentes del fluido de trabajo orgánico R245fa	5
1.3. Descripción del problema	5
2. Fundamentación teórica	9
2.1. Ciclo Rankine convencional	9
2.2. Análisis de masa y energía	10
2.3. Ciclo Rankine con regeneración	12
2.4. Intercambiadores de calor en la etapa de regeneración	13
2.5. Selección de fluidos de trabajo orgánicos	16
2.5.1. Propiedades termofísicas	17
2.5.2. Impacto ambiental y sostenibilidad económica	17
2.6. Aprovechamiento del recurso solar	18
2.6.1. Tecnologías de captación solar	18
2.6.2. Integración con Ciclos Rankine Orgánicos	18
2.7. Captación de energía solar	19
2.7.1. Colector solar térmico	20
2.7.2. Paneles fotovoltaicos	20
3. Hipótesis y Objetivos	21
3.1. Hipótesis	21
3.2. Objetivos	21
4. Metodología	23
4.1. Auditoria energética	23
4.2. Modelo PDCA	24
4.2.1. Etapa de Planeación	24
4.2.2. Etapa de Ejecución	24

4.2.3. Etapa de Control	25
4.2.4. Etapa de Actuar	25
4.3. Implementación cronológica de la norma ISO 50001:2018	26
4.4. Analizador de redes eléctricas	26
4.4.1. Caracterización del comportamiento del R245fa	28
4.5. Evaluación del fluido orgánico R245fa	29
4.6. Sistema de captación solar	30
4.6.1. Definición de requisitos y objetivos	31
4.7. Criterio de selección para uso de radiación solar en planta ORC	33
4.8. Ciclo Rankine Orgánico con sistema de captación solar	34
4.9. Validación de la experimentación	35
4.9.1. Arranque del sistema	36
4.9.2. Arranque de periféricos	36
4.10. Matriz de pruebas	37
5. Resultados y discusión	39
5.1. Requerimientos energéticos	39
5.2. Uso de refrigerante R245fa	42
5.3. Sistema de captación solar	43
5.4. Mediciones de variables planta ORC	44
5.5. Integración de sistema de captación solar	50
5.6. Análisis de datos obtenidos con sistema de instrumentación	55
5.7. Validación de resultados	57
6. Conclusiones	63
6.0.1. Trabajos a futuro	64
7. Anexos	65
Referencias	77
Apéndice	78

Introducción

En 1859, William John Macquorn Rankine, quien era un ingeniero de Escocia publicó un estudio llamado " Manual del motor de vapor y otros motores principales " con el cual hizo un avance significativo en el estudio de los motores térmicos. En el cual desarrollaba una teoría acerca de las máquinas de vapor y calor [1]. El ciclo Rankine lleva su nombre en honor al ingeniero nacido en Escocia. Este ciclo pormenoriza la productividad de los sistemas que cuentan con sistemas de vapor. Recalcar, que el principio teórico de un ciclo Rankine es utilizado en varias áreas como por ejemplo a los motores alternativos; los cuales son aplicados en las locomotoras que funcionan a vapor.

El ciclo Rankine es un proceso termodinámico cíclico idealizado de un motor térmico a presión constante que utiliza una fracción del calor para convertirlo en trabajo mecánico. Como parte del proceso, el calor es suministrado de forma externa a un circuito cerrado donde por lo general se utiliza agua (en fase líquida y de vapor) como fluido de trabajo [2]. En la medida que se han consolidado desarrollos tecnológicos el ciclo Rankine ha sufrido cambios en cuanto a su configuración. Una de estas modificaciones está relacionada con el reemplazo del agua como fluido de trabajo por fluidos refrigerantes orgánicos.

El Ciclo Rankine Orgánico (ORC por sus siglas en inglés) es un sistema termodinámico, destinado a la obtención de potencia o trabajo, comportándose de igual forma que un Ciclo Rankine convencional a vapor de agua. La principal diferencia entre ambos se encuentra en el fluido de trabajo y la temperatura de operación del ciclo [3]. Un ORC es un proceso donde se utiliza un fluido de trabajo orgánico que, de forma alternada se evapora y condensa. A través de la combustión de una sustancia inflamable en una caldera se produce vapor a una presión que está determinada por la caldera (también llamado generador de vapor). Luego el vapor fluye hacia una turbina donde ocurre un proceso de expansión que trae consigo un trabajo mecánico en el eje de la turbina. El vapor expandido en la turbina pierde presión y temperatura, en este punto prosigue su paso a un condensador (también llamado torre de enfriamiento) donde el vapor es condensado para luego ser precipitado. Con posterioridad una bomba de alta presión se encarga de comprimir el líquido para enviarlo nuevamente al generador de vapor, y de esta forma cerrar el ciclo termodinámico [4].

El ciclo Rankine presenta una deficiencia asociada a su funcionamiento. Por características de diseño no es eficiente su rendimiento al utilizar fuentes de energía que no sean capaz de brindar un alto rango de temperatura. Esto impide que se puedan aprovechar fuentes de calor provenientes de energías residuales o renovables donde las temperaturas suelen ser relativamente bajas como por ejemplo la energía solar [5].

La energía solar se obtiene a partir de la radiación del Sol y se utiliza en el caso de los ciclos termodinámicos para calentar fluidos mediante el uso de colectores solares o para generar energía eléctrica mediante el uso de paneles fotovoltaicos [6]. Esta fuente de energía presenta beneficios debido a que es un recurso gratuito e inagotable. A día de hoy las tecnologías para su captación presentan una durabilidad de más de 15 años y los ahorros de energía derivados de su uso son significativos; esto trae como consecuencia que los tiempos de amortización de la inversión sean relativamente cortos. Además la instalación de estos sistemas no es extremadamente compleja, la tecnología de funcionamiento es muy fiable y no producen contaminación sonora, ni por emisiones de gases de efecto invernadero [7].

Los fluidos de trabajo orgánicos son sustancias líquidas o gaseosas que presentan un alto peso molecular y tienen como componente el carbono, esto trae consigo un cambio de fase de líquido a vapor a temperaturas más bajas que las del agua. La selección de los fluidos de trabajo para su utilización en un ORC, constituye un aspecto crucial, puesto que se encuentran limitados por sus características termofísicas (temperatura, presión crítica y estabilidad química) [8]. Estos fluidos orgánicos son compuestos químicos que presentan cadenas de hidrocarburos, por lo que, al tomar en cuenta que la rama de la química encargada del estudio de los compuestos de carbono es la química orgánica, se asume que estos fluidos de trabajo, contienen algún porcentaje de carbono, por lo cual se hace la homogenización de los nombres de estos para llamarlos fluidos orgánicos [9].

Una variable importante a destacar en la elección de los fluidos de trabajo es su comportamiento, para ello se debe seleccionar el fluido de trabajo de acuerdo a la temperatura de operación existente en el suministro de calor. Según [4] la temperatura de operación es el intervalo de valores en grados Celsius donde la eficiencia de un ORC aumenta. [10] plantea en su estudio que la eficiencia es la capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un efecto determinado, es la expresión que mide la capacidad o cualidad de la actuación de un sistema o sujeto. [11] plantea que es posible aumentar la eficiencia térmica de un ORC y explica que existen 3 lineamientos fundamentales para lograrlo:

- Reducir la presión dentro del condensador.
- Sobrecalentar el vapor.
- Incrementar la presión en la caldera.

Para el aumento de la eficiencia térmica la idea es clara, es necesario incrementar la temperatura media a la que el fluido de trabajo ingresa a la caldera. También se puede disminuir la temperatura promedio a la que el calor se rechaza del fluido de trabajo en el condensador. En general, el valor de temperatura debe incrementarse lo máximo posible durante el proceso de adición de calor y lo más baja posible durante el rechazo de calor [12]. Otra forma de aumentar la eficiencia térmica es utilizando la regeneración. Este es un proceso donde una fracción del vapor que ingresa a la turbina se desvía hacia un calentador (también llamado intercambiador de calor) para calentar el agua de alimentación. El inconveniente reside en que esa fracción de vapor en caso de seguir su camino hacia la turbina podría producir mayor trabajo. La zona de la etapa donde se lleva ese vapor desviado se llama zona de regeneración.

El ORC es una tecnología eficaz para la generación de energía a partir de temperaturas de hasta 400 °C y para capacidades que pueden oscilar entre menos de 1kW y hasta 10 MW. La

actual investigación se enmarca en una planta ORC de pequeña escala, el rango para definirla se encuentra en una potencia menor a 1 kW y hasta 10 kW máximo. El uso de la radiación solar para impulsar un ORC es una tecnología basada en energías renovables que puede ser aplicada en estas plantas debido a la alta compatibilidad entre las temperaturas de funcionamiento de las tecnologías de colectores solares térmicos, la potencia eléctrica provista por los paneles fotovoltaicos y las necesidades de temperatura de operación del ciclo [13]. De acuerdo a la bibliografía consultada la eficiencia térmica en un ORC dependiendo del modo de operación puede oscilar entre menos de un 5 % y hasta 76.8 %.

En este trabajo se pretende implementar un sistema de captación solar en la etapa de regeneración en una planta ORC de 1 kW de potencia con el objetivo de mejorar la eficiencia térmica. Con lo cual el rendimiento de la planta ORC mejora comparado con el régimen de operación simple. Al utilizar un fluido de trabajo orgánico se garantiza el rango de trabajo necesario para utilizar la radiación solar como fuente de energía. Se estima obtener una mejora en la eficiencia térmica de al menos un 5 %. La mejora es estimada basado en estudios similares, [14] en su estudio donde presenta un ORC con un sistema de captación solar y recuperación de calor residual, obtiene un aumento de la eficiencia térmica que va desde 11.6 % hasta el 19.7 %. En la investigación de [15] se aborda el diseño óptimo de un ORC con un sistema de captación solar y almacenamiento de energía térmica. Se establece un incremento de la eficiencia térmica que va desde el 17.9 % hasta el 24.8 %. Para las mismas condiciones se compara el rendimiento entre el ORC subcrítico contra el supercrítico; donde este último mejora la eficiencia en un 11.3 %. Las pautas mostradas plantean un escenario favorable para cumplir con el objetivo de la presente investigación y alcanzar las metas establecidas.

1.1. Antecedentes

El desarrollo tecnológico ocurrido en las últimas décadas ha posibilitado el incremento del estándar de vida en las sociedades de hoy en día. Esto trae aparejado consigo un aumento de la demanda energética global. El contexto energético actual no permite ser optimista con respecto al tema. Es necesario comprender que a nivel mundial la tendencia de los países ejecutan constantes esfuerzos por mejorar su situación socio-económica. Esto establece la pauta de que si las economías nacionales crecen al ritmo esperado, la demanda de energía como se presenta en la Figura 1.1 continuarán su progresión al alza en consecuencia de este fenómeno. Lo cual sucedería inclusive si se toman acciones que mejoren la eficiencia energética y que conlleven al final a disminuir el consumo [16].

El uso de la energía solar a nivel mundial ha experimentado un aumento tal y como se aprecia en la Figura 1.2. En la medida que la eficiencia en la captación de los rayos solares ha aumentado; la implementación de sistemas que utilizan el recurso solar como fuente energética se ha incrementado de forma exponencial. El Sol, todos los días es capaz de irradiar al planeta Tierra la cantidad de energía solar para satisfacer la demanda mundial de energía de 1 año [18].

Dentro de las políticas para combatir el cambio climático en la rama industrial se encuentran aquellas que están encaminadas al uso de fuentes renovables de energía, a la regeneración, cogeneración y recuperación de calor residual. Por ejemplo, si una política de implementación de generación de portadores energéticos mediante la energía solar es puesta en marcha de manera correcta, la consecuencia podría ser que el uso de combustible a nivel mundial se reduzca hasta en un 3.9 % [19].

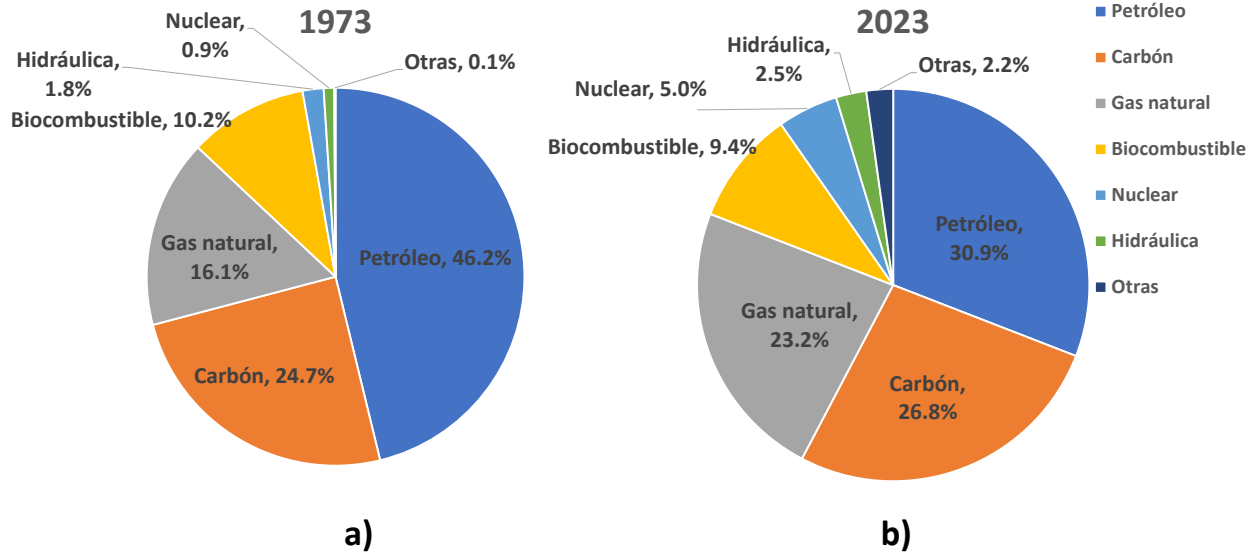


Figura 1.1. Matriz de la generación de energía eléctrica por fuente [17].

La generación de energía eléctrica usando un ORC se torna importante en un escenario donde escasean los combustibles fósiles y los adelantos tecnológicos permiten la implementación de sistemas que utilizan el recurso solar como fuente de energía. Sin embargo, aunque la captación solar se encuentra lejos de sus potencialidades; llevar adelante una estrategia global que abogue por su uso para la generación de electricidad es necesario [7].

Con el agotamiento de los combustibles fósiles y el incremento global de la demanda energética se hace necesario encontrar formas de generación eléctrica que hagan uso de las fuentes renovables disponibles. En este escenario, reforzar el desarrollo e implementación de sistemas ORC con sistemas de captación solar constituyen una forma de generar electricidad de forma amigable con el medio ambiente. Esto posibilita la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y estandariza una tecnología sostenible para producir electricidad. En este contexto, es necesario desarrollar tecnologías para eficientar el uso en los ORC de sistemas de captación de energía solar que permitan maximizar el rendimiento.

A partir de lo anterior planteado y con los resultados de la revisión bibliográfica se identifican una serie de investigaciones que establecen un punto de inicio para llevar a cabo la presente investigación. El cuadro 1.1 muestra los estudios analizados para establecer los antecedentes. En los artículos se aborda el impacto del uso de fluidos orgánicos en el desempeño de un ORC, la utilización del refrigerante R245fa en una turbina radial y el comportamiento de este. Se analizan además los recientes adelantos tecnológicos acaecidos en el área de estudio y que pueden ser aprovechados por esta investigación.

No obstante, la investigación de [20] resulta importante debido a que se desarrolla en una planta prototipo de características similares a la que se analiza en este estudio. De esta forma se pueden comparar los resultados obtenidos con una fuente semejante.

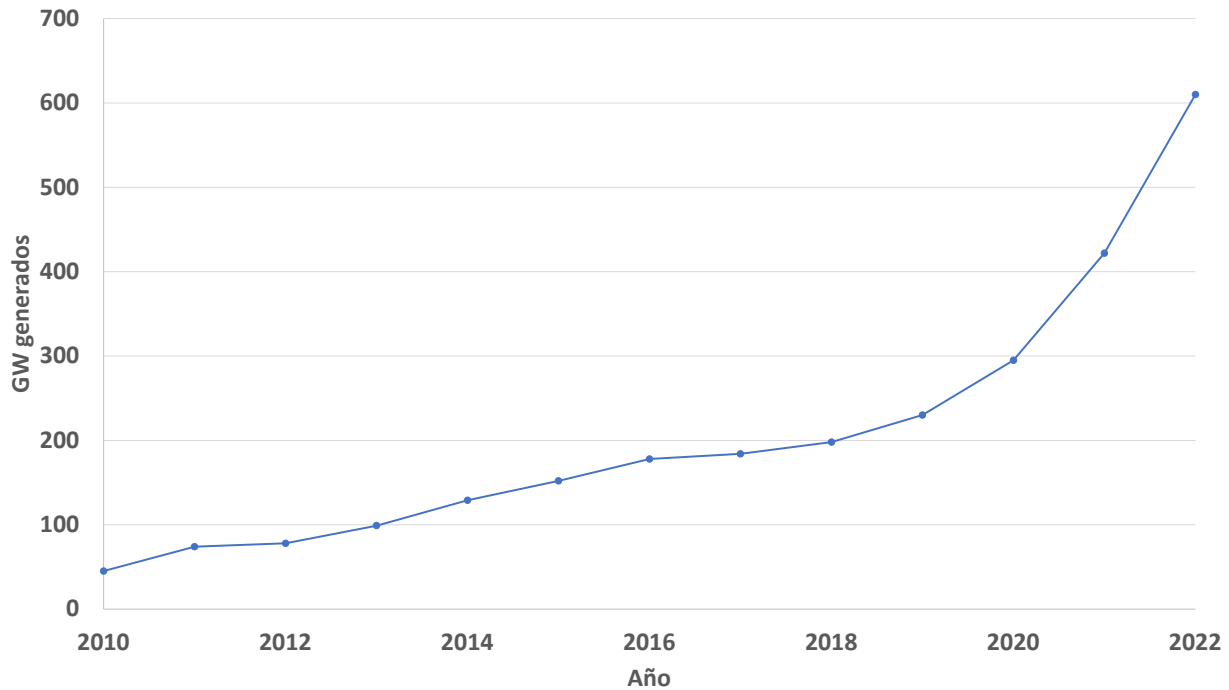


Figura 1.2. Producción de electricidad mediante energía solar [17].

1.2. Antecedentes del fluido de trabajo orgánico R245fa

La actual investigación tiene como objetivo utilizar el fluido de trabajo orgánico R245fa como refrigerante para su uso en la planta ORC y de esta forma fomentar la generación eficiente de energía. Para ello es necesario desarrollar la metodología que se detalla a continuación.

Se realiza una búsqueda de bibliografía afin al tema para establecer cuales son las propiedades termofísicas del fluido de trabajo y como se realiza su aplicación en una planta ORC. Se establecen puntos de comparación en porque usar un tipo de refrigerante u otro y cuales son las ventajas del R245fa. La figura 1.3 muestra sus propiedades físicas y químicas. Se establecen las condiciones de operación de la planta ORC como son la temperatura y la presión nominal que se encuentran en el evaporador y condensador. Se realiza la selección de un intervalo de temperaturas que permite extraer el máximo de eficiencia de la planta ORC al utilizar el refrigerante R245fa.

Para el desarrollo de la actual investigación se utiliza una planta ORC prototipo, esto dificulta la optimización de componentes o sistemas del ORC. No obstante, se puede realizar simulaciones de posibles configuraciones y obtener resultados de laboratorio que luego se pueden contrastar con las mediciones realizadas en campo.

1.3. Descripción del problema

Con el análisis de las ecuaciones involucradas en un ciclo Rankine no se toman en cuenta las pérdidas asociadas a la fricción por el paso del fluido de trabajo por las tuberías, pérdidas por calor, irreversibilidad de los procesos, entre otras [26]. Las plantas a pequeña escala que presentan

Cuadro 1.1. Revisión bibliográfica realizada.

Referencia	Aspectos más destacados
[21]	Ejecuta una búsqueda en las patentes relacionadas con el uso de la energía solar en los ORC, destaca el uso de 4 tecnologías principales: torres solares reflectores lineales de Fresnel, discos parabólicos y discos cilindroparabólicos.
[22]	Establecen criterios de seguridad, operación y medioambientales para la selección de los fluidos orgánicos de trabajo. Se presenta un estudio de viabilidad y una comparación de fluidos seleccionados para diferentes tipos de climas. Se analizan los desafíos relacionados con los componentes, la operación y el costo de la planta.
[23]	Se evalúa la temperatura crítica del fluido orgánico para analizar su estabilidad química. Se establece una metodología para determinar los límites de temperatura de los fluidos orgánicos de trabajo.
[24]	Establece un diseño para un ORC que funciona utilizando el fluido de trabajo R245fa. Considerando el fluido orgánico y las condiciones del ciclo diseñan una turbina axial. Evalúan el rendimiento térmico del ORC.
[20]	Evalúan el rendimiento térmico de un ORC que produce una potencia eléctrica de 1kW. Mediante el uso del software Coolprop evalúan la eficiencia isentrópica de la turbina y determinar el trabajo producido en el eje conectado al generador eléctrico.

como principio de funcionamiento un ORC tienen sistemas acoplados, (bombas, instrumentación de campo, panel de operador) que para su funcionamiento necesitan hacer uso de una fuente de energía externa, o de la misma energía generada por la planta. Además el vapor es generado mediante energía eléctrica o usando algún tipo de combustible (diésel, queroseno, etc). En ocasiones la potencia de los generadores que se encuentran instalados son muy pequeños y la energía que generan prácticamente cubre la potencia eléctrica consumida por los equipos involucrados en el funcionamiento del ciclo, esto no deja margen de potencia generada para ser enviada a los consumidores finales. Dado que se tiene que usar una fuente de energía externa, se limita la versatilidad de estos sistemas puesto que los enmarca en sitios donde existe generación eléctrica [27].

El uso limitado de los fluidos orgánicos en un ORC es una de las desventajas que existen en la actualidad. Estos presentan un punto de ebullición más bajo que el del agua, lo que resulta beneficioso para su uso con fuentes de calor de baja o media temperatura; como las que se obtienen de la radiación solar o del calor residual de algunos procesos industriales. Otro aspecto a tener en cuenta es que estos son capaces de crear una menor corrosión que la que tentativamente puede provocar el agua, esto es especialmente importante debido que se puede alargar con su uso la vida útil de elementos presentes en un ORC como son las bombas o la turbina.

Otro aspecto a considerar es que los fluidos orgánicos tienen la capacidad de operar de forma eficiente a presiones más bajas que el agua; lo que abre la puerta a diseños que mitiguen de mejor manera el estrés mecánico y por ende se aumente la seguridad del sistema. En la actualidad existe una gran variedad de fluidos orgánicos que pueden ser utilizados en un ORC, entre los que destacan el R245fa, R600, R600a, n-Pentano y n-Hexano. Esta gama de refrigerantes permite seleccionar el fluido que más se acople a las condiciones específicas del ciclo en cuestión.

Por último recalcar que muchos de estos fluidos orgánicos tienen un menor impacto ambiental

Estado físico, color	Gas licuado, incoloro	Velocidad de Evaporación	>1 Método: Comparación con Éter
Olor	Tenue olor etéreo	Inflamabilidad (Sólido/Gas)	N.A
Umbral del olor	N.D	Límite Superior/Inferior de Inflamabilidad o Explosividad	Superior= N.A Inferior= N.A
Potencial de Hidrógeno (pH)	Neutral	Presión de vapor	11,227 hPa a 20 °C
Punto de Fusión/Punto de Congelación	-103 °C	Densidad de vapor	4.6 (Aire=1.0)
Punto inicial e Intervalo de Ebullición	15.3 °C	Densidad relativa	1.32 g/cm ³ a 20 °C
Punto de Inflamación	N.A	Solubilidad	En Metanol, soluble parcialmente
Viscosidad	N.A	Coefficiente de Partición N-Octanol/Agua	log Pow: 1.35
Peso molecular	134.03 g/mol	Temperatura de Ignición Espontánea	412 °C

Fórmula química: 1,1,1,3,3-Pentafluoropropano $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CHF}_2$

Familia química: Hidrofluorocarbonos (HFC)

Otros medios de identificación: Enovate, Hidrofluorocarbono 245fa, Refrigerante 245fa, HFC-245fa, R245fa

Figura 1.3. Propiedades físicas y químicas del refrigerante R-245-FA [25].

que los refrigerantes sintéticos convencionales porque en muchos casos son biodegradables o pueden ser reutilizados, lo que tiene un impacto positivo para el medio ambiente. La poca masificación en su uso dentro de los ciclos termodinámicos se debe al elevado costo de adquisición y por otro lado a que la gran mayoría de los equipos existente hoy en los procesos termodinámicos; dígame bombas y turbinas no son compatibles con estos. Lo que limita su implementación puesto que se deben hacer costosas inversiones para poder implementar su uso.

El uso de la energía solar en un ORC puede permitir tener una fuente de energía renovable e inagotable. Usando el recurso solar se obtiene la potencia energética necesaria para abastecer a los equipos involucrados en el funcionamiento del ciclo. De esta forma, la potencia eléctrica del generador queda disponible para su consumo, todo ello posibilita instalar plantas ORC para generar energía en lugares de difícil acceso. El uso de los sistemas de captación solar (paneles fotovoltaicos, colector solar, etc) acoplados a la etapa de regeneración debería producir el vapor saturado que se expande en la turbina, generar trabajo mecánico y aumentar la eficiencia térmica del ciclo. Con el uso de fluidos de trabajo orgánicos se garantiza que, la cantidad de potencia calórica necesaria para generar vapor sea menor que cuando se usa agua como fluido de trabajo [28].

En esta investigación se propone demostrar que el acoplamiento de un sistema de captación de energía solar que, aporte los portadores energéticos a la etapa de regeneración en una planta ORC de hasta 1 kW, mejoraría la eficiencia del ORC porque se elimina la purga al ingreso del fluido de trabajo a la turbina. Esto posibilita enviar el vapor producido en la caldera a la turbina y convertirlo en trabajo útil. Al eliminar la purga en la turbina, se puede maximizar la cantidad de vapor que llega a esta y por lo tanto es posible proveer la energía necesaria a los equipos que funcionan en la planta y lograr la autonomía del ORC. Se estima una mejora de la eficiencia térmica del ciclo al comparar el régimen de operación en modo simple contra la regeneración con uso de sistema de

captación solar en al menos un 5 %. Implementar un sistema que funcione de forma adecuada podría brindar a la industria una herramienta útil para utilizar el calor residual de sus procesos industriales.

Fundamentación teórica

Las centrales termoeléctricas en la actualidad rigen su funcionamiento basados en ciclos de vapor, el ciclo Rankine es el estándar dentro de la industria. Esto establece que la generación eléctrica actual se encuentra vinculada al objeto de estudio de esta investigación. De esta forma se asienta la importancia y relevancia de la realización de investigaciones en esta temática.

2.1. Ciclo Rankine convencional

En su funcionamiento el ciclo ideal no contempla las irreversibilidades internas y este se encuentra compuesto por cuatro procesos [29]:

- 1-2 Compresión isentrópica en una bomba.
- 2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera.
- 3-4 Expansión isentrópica en una turbina.
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.

La **Figura 2.1** muestra un ciclo Rankine ideal simple donde, el agua ingresa a la bomba como líquido saturado en el estado 1, a partir de ese punto se comprime de forma isentrópica hasta la presión de trabajo nominal de la caldera. Durante este proceso de compresión isentrópica aumenta un poco la temperatura del agua motivado por la disminución en el volumen específico del agua. Para efectos de mejorar la compresión y claridad del diagrama T-s se exagera la distancia vertical existente entre los estados 1 y 2. [30].

El agua que circula por la bomba e ingresa a la caldera, lo hace como líquido comprimido en el estado 2. Al pasar por la caldera cambia a vapor saturado y como este abandona la caldera pero en un estado termodinámico 3. La caldera aporta la potencia calórica necesaria para transferir calor al agua, este proceso se realiza a presión constante. Para obtener calor la caldera quema u obtiene energía de los combustibles fósiles, gases de combustión, reactores nucleares u otras fuentes [31].

En el estado 3 el vapor se encuentra sobrecalentado, en este punto ingresa a la turbina donde se expande de forma isentrópica. Este proceso de expansión produce trabajo sobre los alaves de la turbina, lo que se traduce en giro del eje del generador eléctrico conectado a la turbina. Durante esta etapa la temperatura y presión del vapor disminuyen hasta llegar al estado 4, que es donde

el vapor entra a la etapa de condensación. Llegado a este punto la calidad del vapor se mantiene alta y se considera vapor húmedo. Dentro del condensador el vapor se precipita a presión constante, de forma usual el calor se rechaza hacia un medio de enfriamiento como por ejemplo un río, lago, la atmósfera, etc. El ciclo se completa al convertirse el vapor en líquido saturado e ingresar a la bomba nuevamente [32].

En el diagrama T-s, el área bajo la curva del proceso representa la transferencia del calor para procesos internamente reversibles. De forma detallada el área bajo la curva del proceso 2-3 representa el calor aportado al agua dentro de la caldera y por otro lado el área bajo la curva del proceso 4-1 muestra el calor rechazado en el condensador. El trabajo neto producido por el ciclo es la diferencia entre las dos áreas.

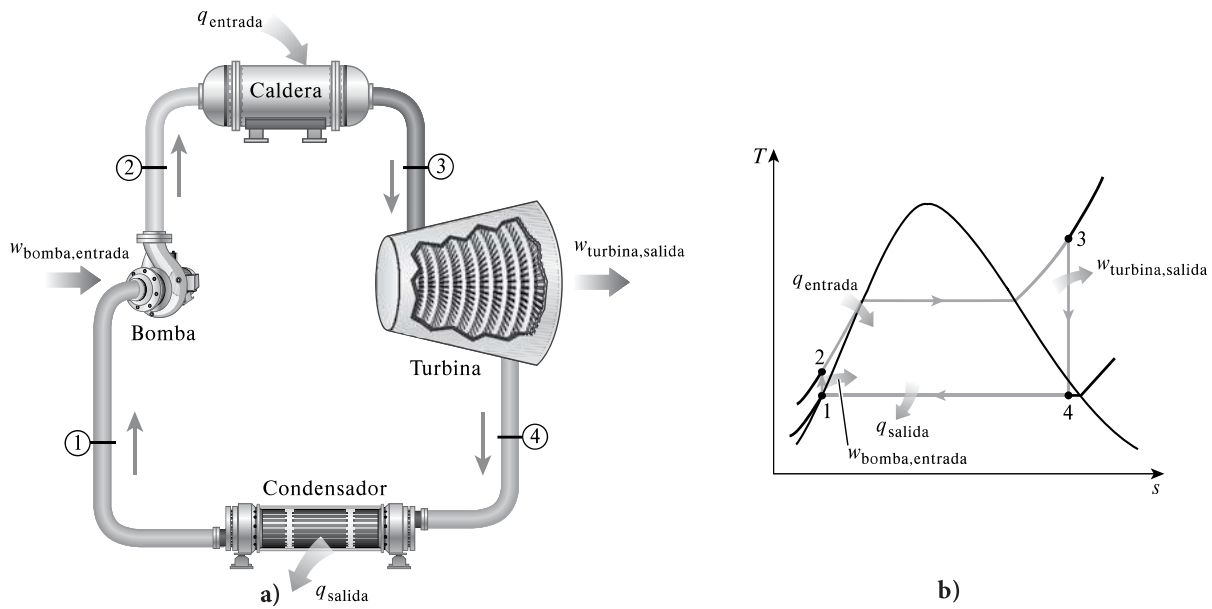


Figura 2.1. Ciclo Rankine ideal simple [17]

2.2. Análisis de masa y energía

En orden de comprender de forma teórica el funcionamiento del ciclo Rankine, es necesario establecer las leyes y ecuaciones que rigen su comportamiento. Dentro de la rama ingenieril, algunos sistemas se suelen idealizar para simular que se encuentran en estado estacionario; esto equivale a que las propiedades de estos se mantienen estáticas a medida que pasa el tiempo. En el caso de los volúmenes de control, la identidad de la materia dentro de estos se modifica permanentemente,

pero la cantidad total presente en cualquier instante permanece constante [33], bajo este precepto, entonces:

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad (2.1)$$

donde:

$\sum_e \dot{m}_e$ representa la sumatoria total de materia entrante.

$\sum_s \dot{m}_s$ representa la sumatoria total de materia saliente.

La ecuación 2.1 plantea que los flujos totales de materia entrante y saliente son iguales. El autor [34] plantea que aunque los flujos totales de masa tanto de entrada como de salida presentan una igualdad, esto no significa tácitamente que el volumen de control se encuentra en estado estacionario, debido a que aunque la cantidad de masa dentro del volumen de control en todo momento será constante; otras propiedades como la presión o la temperatura podrían variar con el tiempo. Se debe recalcar que cuando en estado estacionario se encuentra un volumen de control, todas las propiedades son independientes del tiempo. Destacar que la presunción sobre el estado estacionario y el flujo unidimensional son idealizaciones independientes, no es necesario el cumplimiento de una para que la otra sea válida. De forma general se puede expresar que la suma de los flujos másicos a la entrada es igual a los flujos másicos de salida [35].

La 1ra Ley de la Termodinámica explica su funcionamiento como un proceso bajo flujo estacionario, esto se debe a que los componentes que conforman el ciclo Rankine (bomba, caldera, turbina y condensador) son dispositivos de este tipo [2]. De acuerdo con la 1ra Ley de la Termodinámica, la energía no puede ser creada o destruida; solo cambia de forma [36].

$$(\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}) + (\dot{W}_{in} - \dot{W}_{out}) + (\dot{E}_{mass,in} - \dot{E}_{mass,out}) = \frac{dE_{sys}}{dt} \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 en estado estacionario donde $\frac{dE_{sys}}{dt} = 0$, se puede expresar de la siguiente manera:

$$(\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}) + (\dot{W}_{in} - \dot{W}_{out}) + (\dot{E}_{mass,in} - \dot{E}_{mass,out}) = 0 \quad (2.3)$$

Realizando el desarrollo de los términos de la ecuación 2.3, el balance de energía queda como:

$$(\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}) + (\dot{W}_{in} - \dot{W}_{out}) + \sum_e \dot{m}_e (h_e + \frac{C_e^2}{2} + gz_e) - \sum_s \dot{m}_s (h_s + \frac{C_s^2}{2} + gz_s) = 0 \quad (2.4)$$

donde:

$\dot{Q}_{in}, \dot{Q}_{out}$ representa el calor de entrada y salida respectivamente del sistema termodinámico.

$\dot{W}_{in}, \dot{W}_{out}$ representa el trabajo de entrada y salida respectivamente del sistema termodinámico.

h_e, h_s representa la entalpía de entrada y salida respectivamente del sistema termodinámico.

$\frac{C_e^2}{2}, \frac{C_s^2}{2}$ representa la energía cinética de entrada y salida respectivamente del sistema termodinámico.

gz_e, gz_s representa la energía potencial de entrada y salida respectivamente del sistema termodinámico.

De la ecuación 2.4 se establecen vínculos solo entre las cantidades de energía que se transfieren cuando se evalúan en la frontera del volumen de control. Cuando se desarrolla el balance de energía para analizar un sistema termodinámico se hace imprescindible utilizar las mismas unidades para todas las variables presentes. Esto quiere decir que si se utilizan unidades del Sistema Internacional de Unidades (SI por sus siglas en inglés), por ejemplo en este caso todos los términos debería expresar en kJ/kg [37]. El ciclo Rankine convencional es un sistema donde en función de las características específicas de la instalación convergen una serie de configuraciones diferentes. Para el caso de este trabajo de tesis se analiza el ciclo Rankine convencional y el ciclo Rankine con regeneración.

2.3. Ciclo Rankine con regeneración

La **Figura 2.2** representa un ciclo Rankine regenerativo, la gráfica evidencia que el calor transferido al fluido de trabajo durante el proceso 2-2' se produce a una temperatura relativamente baja. Lo cual hace que disminuya la temperatura a la que se suministra el calor y como consiguiente que disminuya la eficiencia térmica del ciclo [11].

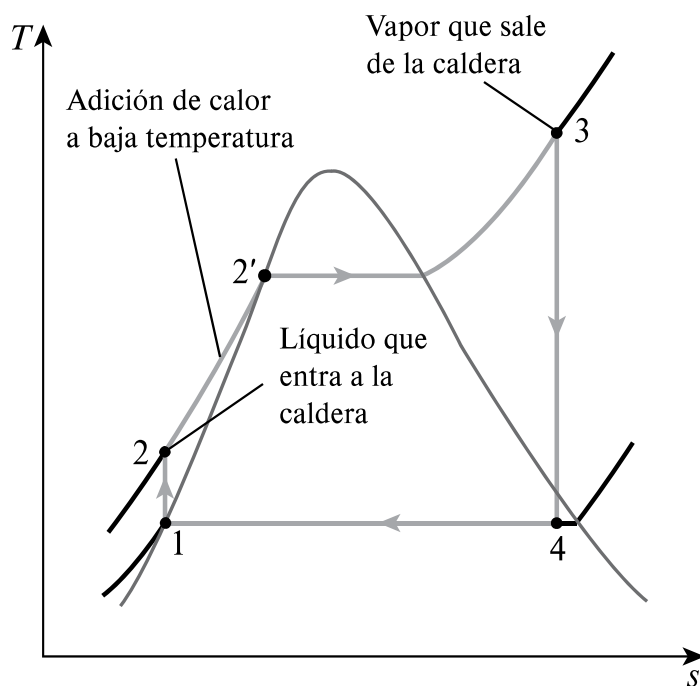


Figura 2.2. Diagrama Temperatura-Entropía (T-s) Ciclo Rankine Ideal Regenerativo [11].

Con el fin de corregir las deficiencias, se procura incrementar la temperatura a la que el fluido de trabajo sale de la bomba. Una vía de lograrlo consiste en proveer calor al fluido de trabajo en un intercambiador de calor a contraflujo que se encuentra acoplado a la turbina, esto en otras palabras es utilizar regeneración. No obstante, en la práctica esta solución no resulta factible debido a la dificultad inherente de diseñar un intercambiador de calor que pueda desempeñar de forma adecuada la operación, puesto que se incrementa la humedad del vapor en las etapas finales de la

turbina [38].

En las termoeléctricas actuales se ejecutan procesos de regeneración. Esto se logra al extraer vapor en diferentes puntos de la turbina. Dicho vapor, que posee la capacidad de producir más trabajo en caso de expandirse en la turbina, es utilizado por otro lado en calentar el fluido de trabajo. El dispositivo donde el fluido de trabajo se calienta se llama regenerador [11].

Una etapa de regeneración en un ciclo termodinámico no solo es capaz de mejorar la eficiencia térmica del ciclo, posibilita además una forma de eliminar o atenuar al menos la cantidad de aire que contiene el fluido de trabajo que pasa a través del condensador y es un mecanismo para mitigar la corrosión en la caldera. Otra característica, es que la regeneración controla el flujo volumétrico del vapor en las últimas finales de la turbina [27].

2.4. Intercambiadores de calor en la etapa de regeneración

El intercambiador de calor en esta etapa es un dispositivo donde convergen dos circuitos; uno es el encargado del paso del flujo de vapor obtenido de calentar el fluido de trabajo y el otro se encarga de transportar el agua caliente que se obtiene al circular esta por el sistema de captación solar. En el caso específico de la planta ORC se combina (más no se mezclan) la fracción de vapor extraída de la turbina con el agua caliente proveniente del sistema de captación solar. De forma idealizada, la mezcla sale del generador como vapor sobrecalentado a la presión de este [39]. El esquema de un ciclo Rankine con una etapa de regeneración y el diagrama T-s del ciclo se muestran en la Figura 2.3. Los números que se encuentran en la siguiente figura corresponden a los estados descritos a continuación.

Un sistema tipo basado en un ciclo Rankine con regeneración es aquel donde el vapor ingresa a la turbina a la presión de la caldera (estado 5) y donde luego se expande de forma isentrópica hasta una presión intermedia (estado 6). Luego de lo cual se extrae una fracción de vapor en el mismo estado y a su vez se envía al intercambiador de calor por donde fluye el agua de alimentación [40].

La otra porción de vapor continua su paso hacia el condensador, donde se continua expandiendo de forma isentrópica hasta la presión existente en el condensador (estado 7). El vapor a la salida del condensador se encuentra como líquido saturado a la presión del condensador (estado 1). El agua que en este punto se encuentra condensada, es comprimida en una bomba isentrópica, donde el agua alcanza la presión del calentador del agua de alimentación (estado 2) y donde posteriormente se mezcla con el vapor extraído de la turbina [41].

La fracción del vapor tiene un volumen tal que cuando es mezclado con el vapor a la salida del calentador, lo hace como líquido saturado a la presión del calentador (estado 3). En la ejecución completa del ciclo, una segunda bomba eleva la presión del agua hasta la presión de operación de la caldera (estado 4). De esta forma se completa el ciclo cuando se calienta el agua de la caldera para que fluya hasta el estado de entrada de la turbina (estado 5) [42].

Con el análisis de las plantas eléctricas a vapor, resulta más factible realizar los cálculos trabajando con magnitudes expresadas en masa del vapor que fluye por la caldera. De esta forma, por cada 1 kg de vapor que escapa de la caldera, y kg se expanden de forma parcial en la turbina y se extraen en el estado 6. El vapor restante $(1 - y)$ kg, se dilata completamente hasta alcanzar la presión del condensador. Lo que trae como consecuencia que, los flujos másicos no son los mismos en los diferentes componentes que conforman el ciclo [43].

Por ejemplo, en el caso del flujo másico que circula a través de la caldera, el cual es \dot{m} y será de $(1 - y) \dot{m}$ a través del condensador. Esto constituye una característica del ciclo Rankine con

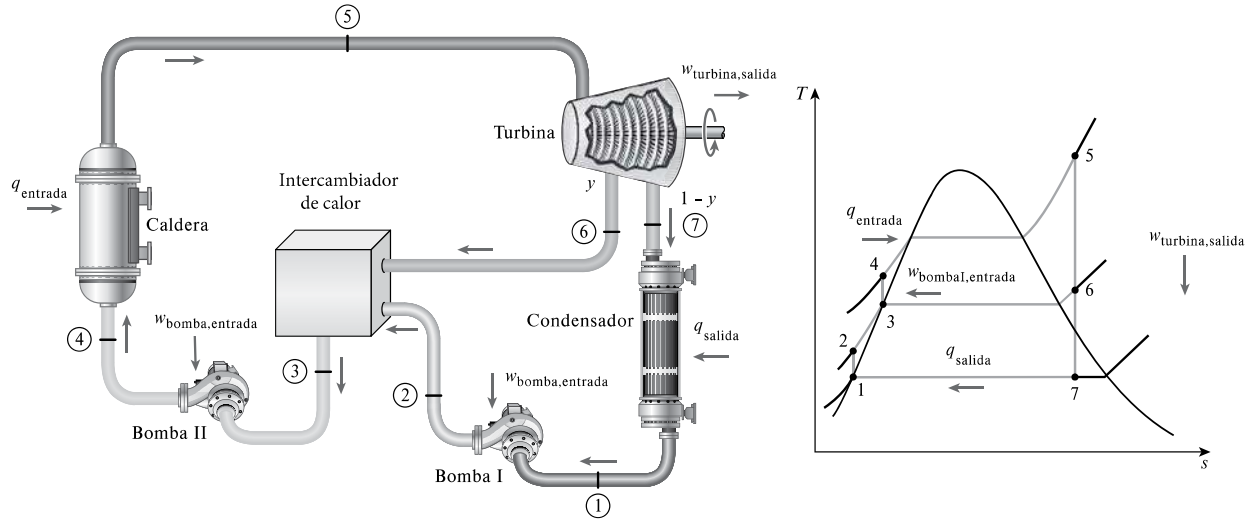


Figura 2.3. Esquema de un ciclo de Rankine ideal con regeneración y su diagrama T-s [11]

regeneración y debe ser considerada en el análisis del ciclo, así como en la interpretación de las áreas en el diagrama T-s. De acuerdo con la Figura. 2.3, el calor y las interacciones de trabajo de un ciclo Rankine con regeneración con un calentador de agua de alimentación pueden expresarse por unidad de masa de vapor que fluye a través de la caldera como [30]:

$$q_{entrada} = h_5 - h_4 \quad (2.5)$$

donde:

$q_{entrada}$ = Calor de entrada a la caldera. Se expresa en kJ/kg.

h_5, h_4 = Entalpía a la salida y entrada de la caldera respectivamente. Se expresa en kJ/kg.

La q_{salida} se obtiene mediante la ecuación 2.6:

$$q_{salida} = (1 - y)(h_7 - h_1) \quad (2.6)$$

donde:

q_{salida} = Calor de salida en el condensador. Se expresa en kJ/kg.

y = Fracción de vapor extraído. Es una variable adimensional.

h_5, h_4 = Entalpía a la salida y entrada del condensador respectivamente. Se expresa en kJ/kg.

La $w_{turbina,salida}$ es el trabajo de la turbina y se obtiene de acuerdo a la ecuación 2.3:

$$w_{turbina,salida} = (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7) \quad (2.7)$$

$w_{turbina,salida}$ = Trabajo de salida de la turbina. Se expresa en kJ/kg.

h_5, h_6 = Entalpía a la salida y entrada del condensador y turbina respectivamente. Se expresa en kJ/kg.

y = Fracción de vapor extraído. Es una variable adimensional.

h_6, h_7 = Entalpía a la entrada y salida de la turbina respectivamente. Se expresa en kJ/kg.

La $w_{bomba,entrada}$ es el trabajo de entrada a la bomba y se obtiene de acuerdo a la ecuación 2.8:

$$w_{bomba,entrada} = (1 - y)w_{bombaI,entrada} + w_{bombaII,entrada} \quad (2.8)$$

donde:

$w_{bomba,entrada}$ = Trabajo de entrada a la bomba. Se expresa en kJ/kg.

$w_{bombaI,entrada}$ = Trabajo de entrada a la bomba I. Se expresa en kJ/kg.

$w_{bombaII,entrada}$ = Trabajo de entrada a la bomba II. Se expresa en kJ/kg.

y = Fracción de vapor extraído y se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$y = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_6} \quad (2.9)$$

donde:

y = Fracción de vapor extraído. Es una variable adimensional.

\dot{m}_5, \dot{m}_6 = Flujo másico a través de la caldera. Se expresa en kg/s.

Sustituyendo en las fórmulas anteriores se calcula la $w_{bomba,entrada}$ en la ecuación 2.10:

$$w_{bomba,entrada} = v_1(P_2 - P_1) \quad (2.10)$$

donde:

$w_{bomba,entrada}$ = Trabajo de entrada a la bomba. Se expresa en kJ/kg.

v_1 = Volumen del líquido saturado en la caldera. Se expresa m^3/kg .

P_1, P_2 = Presión a la entrada y salida de la caldera respectivamente. Se expresa en kPa.

Sustituyendo en las fórmulas anteriores se calcula la $w_{bombaII,entrada}$ en la ecuación 2.11:

$$w_{bombaII,entrada} = v_3(P_4 - P_3) \quad (2.11)$$

donde:

$w_{bombaII,entrada}$ = Trabajo a la entrada de la bomba II. Se expresa en kJ/kg.

v_3 = Volumen del líquido saturado en el condensador. Se expresa m^3/kg .

P_1, P_2 = Presión a la entrada y salida del condensador respectivamente. Se expresa en kPa.

Debido al proceso de regeneración aumenta la eficiencia térmica del ciclo Rankine. Lo cual se debe a que a modo general se incrementa la temperatura a la que se transfiere el vapor a la caldera, esto posibilita que se aumente la temperatura del fluido de trabajo antes de su ingreso a la caldera. En el caso de que se puedan instalar dentro del ciclo una mayor cantidad de intercambiadores de calor, aumentaría bajo este supuesto la eficiencia del ciclo. En casos así entran a valorarse otros factores como el económico para valorar que tan viable es llevar a cabo la instalación contra los beneficios a obtener [44].

Para el cálculo de la eficiencia térmica de un ciclo Rankine se utiliza la siguiente ecuación:

$$n_{ter} = \frac{w_{neto}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} \quad (2.12)$$

donde

$$w_{neto} = q_{entrada} - q_{salida} = w_{turbina,salida} - w_{bomba,entrada} \quad (2.13)$$

donde:

n_{ter} = Eficiencia térmica de un ciclo rankine. Se expresa en %.

w_{neto} = Trabajo neto del ciclo rankine. Se expresa en kJ/kg.

$q_{entrada}$ = Calor de entrada a la caldera. Se expresa en kJ/kg.

q_{salida} = Calor de salida en el condensador. Se expresa en kJ/kg.

$w_{turbina,salida}$ = Trabajo de salida de la turbina. Se expresa en kJ/kg.

$w_{bomba,entrada}$ = Trabajo de entrada a la bomba. Se expresa en kJ/kg.

2.5. Selección de fluidos de trabajo orgánicos

Un ORC posee la capacidad de operar con una amplia gama de fluidos de trabajo, los cuales tienen diferentes características. Normalmente, esto conlleva a la necesidad de obtener mucha información acerca del refrigerante en cuestión con el objetivo de conocer sus particularidades y de esta forma maximizar la producción de vapor. Resulta importante recalcar que los fluidos de trabajo deben tener la capacidad de permitir altas tasas de transferencia y estabilidad desde la fuente y hacia el sistema instalado encargado de la recuperación de calor [45].

Cuando se realiza un análisis de la fuente de calor (caldera ó generador de vapor), la temperatura es la variable más crítica; esto se debe a la relación directa que tiene con la correcta selección del fluido de trabajo orgánico. Existe una regla general que se aplica en estos sistemas termodinámicos y consiste en que en la medida de que una mayor temperatura es necesaria, el fluido de trabajo requiere un nivel de temperatura más elevado [46].

Los fluidos de trabajo orgánicos, conocidos coloquialmente como refrigerantes, se clasifican en fluidos húmedos, secos e isentrópicos. La pendiente negativa en una curva de saturación de Temperatura - entropía (T-s) es la forma que mejor representa a los fluidos húmedos, entre los cuales se puede citar al agua y el vapor. Una pendiente positiva dentro de una curva de saturación T-s sugiere que se trata de un fluido seco. Para el funcionamiento del ORC, la mayoría de los fluidos de trabajo se encuentran dentro de los clasificados como secos. La curva de saturación vertical se encuentra asociada a los fluidos isentrópicos, esto significa que los valores de entropía específicos son similares a los valores del vapor saturado en los diferentes niveles de temperatura [47].

Actualmente, el interés dentro de la comunidad científica por desarrollar el campo de los fluidos orgánicos es elevado, lo cual se debe a que su uso es fundamental para lograr una producción de electricidad eficiente. Además, por otra parte es garantía de aprovechar las fuentes de calor de baja temperatura [48]. Para la utilización de un fluido de trabajo en un ORC se llevan a cabo simulaciones por computadora, con esto se busca establecer el rendimiento teórico del ciclo en función de las características propias del ORC y del fluido de trabajo en sí (propiedades termofísicas). En base a los resultados obtenidos se escoge el fluido de trabajo adecuado para utilizar en el ORC. Otra forma de seleccionar el fluido de trabajo orgánico se realiza cuando el fabricante de los componentes (turbina, bomba, etc) enmarca en los datos de los equipos cuales son los fluidos de trabajo con los cuales funcionan sus dispositivos de forma adecuada [49].

Para la ejecución de este proyecto se pretende evaluar el rendimiento del refrigerante R245fa. [50] plantea que los fluidos de trabajo orgánicos presentan las características termofísicas idóneas para su utilización con fuentes de calor de bajo potencial calórico, como el que se obtiene del uso de la radiación solar. La selección adecuada de fluidos orgánicos en los ciclos Rankine es un aspecto crucial en el diseño y operación eficiente de sistemas de generación de energía térmica. Estos ciclos, que convierten la energía térmica en energía mecánica y, finalmente, en electricidad, dependen en gran medida de las propiedades termofísicas y químicas del fluido de trabajo. A continuación, se detalla con detenimiento las características principales de los fluidos de trabajo orgánicos.

2.5.1. Propiedades termofísicas

La utilización de un fluido de trabajo orgánico dentro de un ORC se basa en sus propiedades termofísicas, entre las cuales destacan la capacidad calorífica, conductividad térmica, densidad y viscosidad. La eficiencia térmica del ciclo, la transferencia de calor y la compacidad del sistema se encuentra estrechamente vinculada a estas propiedades. Investigaciones recientes resaltan que se puede mejorar la eficiencia general del ciclo al considerar el análisis exhaustivo de las propiedades termofísicas [51].

Para la selección del fluido de trabajo con el que opera el ORC es necesario tener en cuenta la temperatura nominal de operación de este. En función de las propiedades termofísicas, algunos fluidos son más adecuados para utilizarlos a temperaturas bajas, mientras que otros son más eficientes con temperaturas más elevadas. Con el objetivo de maximizar la eficiencia térmica del ciclo se debe seleccionar un fluido que tenga un rango de operación que abarque la temperatura de entrada y salida del fluido de trabajo dentro del ciclo termodinámico [52].

2.5.2. Impacto ambiental y sostenibilidad económica

Encontrar el equilibrio entre la sostenibilidad y el impacto ambiental que produce la fabricación de fluidos orgánicos es un aspecto tenido en cuenta dentro de la comunidad científica. Una característica fundamental al momento de seleccionar un fluido de trabajo se encuentra relacionado con establecer que estos tengan un potencial bajo de agotamiento de la capa de ozono, de esta forma se contribuye a mitigar los problemas ambientales que afectan a la sociedad a día de hoy [53].

Con el fin de garantizar la robustez y vida útil del sistema es necesario valorar la estabilidad química del fluido de trabajo orgánico. Resulta necesario establecer parámetros de evaluación de la estabilidad química con el fin de limitar la pérdida de rendimiento y la degradación cuando se encuentre el ORC en operación [54].

Los costos económicos y la disponibilidad de los fluidos orgánicos constituyen factores determinantes al momento de seleccionar el refrigerante idóneo para el ORC. Garantizar contar con el suministro o la herramientas financieras adecuadas garantizan la implementación de los fluidos de trabajo orgánicos en los ORC [55]. En resumen, la selección de fluidos orgánicos en los ciclos Rankine es un proceso multidisciplinario que involucra propiedades termofísicas, temperatura de operación, sostenibilidad ambiental, estabilidad química, factores económicos y disponibilidad en el mercado. Una evaluación integral de estas consideraciones garantizará el rendimiento eficiente y sostenible de los sistemas de generación de energía térmica basados en ciclos Rankine.

2.6. Aprovechamiento del recurso solar

En la búsqueda por parte de la comunidad científica de fuentes de energía amigables con el medio ambiente y que a su vez sean renovables, emerge el uso de la radiación solar en un ORC como una alternativa. Desde esa perspectiva, el uso del recurso solar permite su integración dentro de un ciclo Rankine como fuente primaria de calor mediante su uso en sistemas de generación de vapor, recalentamiento, etc [56].

El recurso constituye una fuente de energía interminable, la cual en función de la tecnología aplicada se puede convertir en calor, energía eléctrica, vapor, etc. Las tecnologías para implementar el uso de la radiación solar en ORC ha sido testigo de múltiples investigaciones. [57] fundamenta que la implementación de sistemas que utilicen la radiación solar puede aumentar la eficiencia global de un ORC.

2.6.1. Tecnologías de captación solar

El acoplamiento de tecnologías que utilicen la radiación solar en un ORC depende en gran medida de los avances tecnológicos suscitados en la última década. Existen varios tipos de sistemas que utilizan el recurso solar, entre los cuales se pueden citar los sistemas de concentradores solares parabólicos y las torres solares. Estudios publicados sobre de estos sistemas analizan la eficiencia y la viabilidad en la implementación y puesta en marcha en un ORC [58].

[59] plantea que a causa de las condiciones climáticas, la época del año, la variabilidad en la radiación solar e inclusive la situación geográfica se torna importante garantizar la estabilidad de los sistemas de almacenamiento térmicos. De esta forma se posibilita un suministro estable de calor para mantener un ORC en funcionamiento inclusive cuando las condiciones climáticas no son las idóneas.

2.6.2. Integración con Ciclos Rankine Orgánicos

El uso de los fluidos orgánicos es compatible con su uso en un ORC debido a su capacidad para operar de forma eficiente a bajas temperaturas. En el estudio de [60] se explora la idoneidad de alguno de estos fluidos para implementarlos en un ciclo Rankine, brindando detalles a tener en cuenta para una puesta en marcha exitosa.

El incremento de las tecnologías que utilizan fuentes renovables de energía se encuentran al alza. Establecer sistemas de generación de energía como es el caso de un ORC donde el uso de la radiación solar sea un estándar contribuye a la sostenibilidad ambiental y a reducir la huella de carbono [61]. La variabilidad en la disponibilidad de la radiación solar a lo largo del día y las condiciones climáticas hace necesario el desarrollo de sistemas de almacenamiento térmico eficientes. Investigaciones como la de [62] destacan la importancia del almacenamiento térmico para garantizar un suministro constante de calor a los ciclos Rankine, incluso en ausencia de radiación solar directa.

La implementación exitosa de la radiación solar en ciclos Rankine depende de tecnologías avanzadas de captura solar. Sistemas de concentradores solares, como los parabólicos y las torres solares, han sido objeto de intensa investigación. Trabajos como el de [63] analizan la eficiencia y la viabilidad técnica de estos sistemas para la concentración de la radiación solar y su aplicación en ciclos Rankine.

2.7. Captación de energía solar

El presente estudio se desarrolla en el estado de Querétaro, México. La ubicación geográfica de esta zona garantiza una irradiación solar estable a lo largo de un año calendario. Específicamente la región de estudio se encuentra en las coordenadas 15.8375° N 92.7577°. El potencial energético se mide en radiación solar y se expresa en kilovatios-hora por metro cuadrado (kWh/m^2). El promedio mundial es de 3,9 kWh/m^2 [64]. La radiación solar se expresa típicamente como radiación total en una superficie horizontal o como radiación total en una superficie que sigue al sol [65].

donde:

kWh = Energía consumida en Watts en una hora.

m^2 = Unidad de área.

De acuerdo a datos publicados por el departamento de Geofísica de la Universidad Autónoma de México [66], en el estado de Querétaro existen condiciones favorables para el uso de la energía solar como fuente energética, puesto que la radiación solar promedio oscila entre 7.69 - 8.62 kWh/m^2 .

A pesar de contar con las condiciones de radiación solar adecuadas para su uso como fuente de energía en el estado de Querétaro, es necesario conocer el total de energía solar disponible. De acuerdo con [67] la energía solar total disponible para un sistema de captación solar (colectores solares y paneles fotovoltaicos) se determina como la cantidad de radiación del haz (G_b) en la apertura del colector (A_c) y se rige por la siguiente ecuación:

$$Q_{solar} = A_c * G_b \quad (2.14)$$

donde:

Q_{solar} = Energía solar disponible. Se expresa en Watts.

A_c = Área de captación solar. Se expresa en m^2 .

G_b = Cantidad de irradiación del haz solar. Se expresa en W/m^2 .

De acuerdo con Cesca [68] la energía útil absorbida por los colectores solares se puede calcular de la siguiente manera:

$$Q_u = m_c * C_{p,oil} * (T_{out} - T_{in}) \quad (2.15)$$

donde:

Q_u = Energía útil absorbida. Se expresa en Watts.

m_c = Flujo másico. Se expresa en kg/s.

$C_{p,oil}$ = Capacidad calorífica específica del aceite térmico. Se expresa en J/kg°K.

T_{in}, T_{out} = Temperaturas del aceite térmico a la entrada y salida del colector solar. Se expresan en °C.

La eficiencia térmica del colector solar (n_c) se calcula mediante la ecuación [3]:

$$n_c = \frac{Q_u}{Q_{solar}} \quad (2.16)$$

donde:

n_c = Eficiencia térmica del colector solar. Se expresa en %.

Q_u = Energía útil absorbida. Se expresa en Watts.

Q_{solar} = Energía solar disponible. Se expresa en Watts.

La eficiencia global del colector solar se calcula de acuerdo a Blanco [69] mediante la siguiente ecuación:

$$n_g = 0,75 - 0,000045 - (T_{in} - T_{am}) - 0,039 * \left(\frac{T_{in} - T_{am}}{G_b}\right) - 0,039 * G_b * \left(\frac{T_{in} - T_{am}}{G_b}\right)^2 \quad (2.17)$$

donde:

n_g = Eficiencia global del colector solar. Se expresa en %.

T_{in} = Temperaturas del aceite térmico a la entrada del colector solar. Se expresa en °C.

T_{am} = Temperatura ambiente. Se expresa en °C.

G_b = Cantidad de irradiación del haz solar. Se expresa en W/m^2 .

De acuerdo a [67] “con el desarrollo de la ecuación 2.17 se obtiene la potencia eléctrica generada por un sistema de captación solar”.

2.7.1. Colector solar térmico

Es un dispositivo cuya función fundamental es capturar la radiación solar y convertirla en energía térmica. Su funcionamiento se resume en la transformación energética de radiación solar en energía térmica. Para un rango de temperatura medio o bajo como los utilizados en un ORC se utilizan los captadores solares de placa plana porque su intervalo de operación se adecua perfectamente a la zona de operación de la planta ORC. Para efectos de selección se considera que una aplicación solar es a baja temperatura cuando el fluido de trabajo no presenta una temperatura mayor a 80°C [70]. Los sistemas de captadores solares suelen instalarse en edificaciones particulares o instalaciones de pequeña envergadura. Existen tres tipos de plantas para generar energía solar térmica:

- Las plantas de alta temperatura que operan con temperaturas por encima de los 500°C (773 grados kelvin).
- Las plantas de media temperatura que operan entre los 100°C y 300°C.
- Las instalaciones de baja temperatura se utilizan habitualmente en viviendas y trabajan con temperaturas menores a 65°C.

2.7.2. Paneles fotovoltaicos

Mediante el uso de sistemas fotovoltaicos es posible convertir la radiación solar en electricidad. Este proceso se realiza a través de las fotocélulas que se encuentran en pequeños módulos, estas son unos materiales semiconductores fabricados usualmente de silicio. La radiación solar excita a los electrones dentro de las células que conforman la celda. Cuando los rayos del sol impactan estas celdas provocan el movimiento de los electrones dentro de las celdas y de esta manera se genera una pequeña corriente eléctrica. Este proceso lleva el nombre de efecto fotovoltaico y la forma en la que se convierte la radiación solar en electricidad [71].

Los sistemas fotovoltaicos pueden ser de dos tipos distintos:

- Sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica pública.
- Sistemas fotovoltaicos aislados de la red eléctrica. Este tipo de sistemas se utilizan para autoconsumo y se puede utilizar en viviendas aisladas, iluminación de carreteras u otros lugares remotos.

Hipótesis y Objetivos

3.1. Hipótesis

La eficiencia térmica de una planta ORC de hasta 1 kW con una sistema de captación solar acoplado a la etapa de regeneración, es mayor que en el ciclo Rankine simple debido a que la potencia térmica requerida para la operación proviene de la radiación solar, por lo cual el vapor sobrecalentado convertido en trabajo útil en la turbina representa el volumen de vapor producido en la caldera en comparación con un sistema de regeneración tipo donde existe una purga que alimenta con vapor a dicha estructura lo que trae consigo que el flujo de vapor hacia la turbina sea menor provocando un menor trabajo en la turbina.

3.2. Objetivos

Integrar un sistema de aprovechamiento del recurso solar en la etapa de regeneración mediante el uso de fluidos orgánicos y un sistema de gestión de energía que permita aumentar la eficiencia térmica de una planta ORC con una potencia de 1 kW.

Objetivos particulares

- Determinar los requerimientos energéticos de la planta ORC prototipo mediante la ejecución de una auditoría por medio del uso de la norma ISO 50001.
- Evaluar el impacto del fluido de trabajo orgánico R-245fa en la eficiencia térmica del ciclo Rankine utilizando las ecuaciones de balance de masa y energía.
- Seleccionar el sistema de captación de energía solar basado en los criterios de diseño y los resultados de la auditoría energética.
- Integrar sistema de captación solar a planta ORC prototipo utilizando las mediciones obtenidas con el sistema de adquisición de datos.
- Validar el sistema de captación solar al analizar la eficiencia térmica de la planta ORC.

Metodología

El presente capítulo se enfoca en la estructura metodológica que sustenta la presente investigación. En esta sección se delinea el marco conceptual y se establecen las estrategias que permitirán la adquisición e interpretación de los datos. Además, se presenta el diseño de la investigación, el proceso de toma de datos y las técnicas utilizadas para lograrlo. La presente metodología no solo valida los resultados obtenidos, sino que también establece rigor y coherencia a la investigación para lograr los objetivos propuestos.

4.1. Auditoría energética

La Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) publicó por primera vez en el 2011 la norma ISO 50001, el cual constituye un estándar para la implementación de sistemas de gestión de la energía (SGE). La normativa se actualizó en el año 2018, siendo esta la versión más reciente. ISO estima que el cumplimiento de su norma 50001 es responsable del ahorro de hasta un 60 % en el consumo de energía a nivel global [72].

La ISO 50001:2018 establece las pautas necesarias para que las entidades puedan desarrollar su política energética, cumplir sus objetivos y a su vez mejoren la eficiencia dentro de sus instalaciones. Esta norma se basa en modelo de mejora continua nombrado PDCA (por sus siglas en inglés). El ciclo se basa en una nomenclatura basada en Planificar, Hacer, Verificar y Actuar, lo cual promueve la reducción de costos de operación y la eficiencia energética [73]. Como ejes fundamentales de la norma se erigen, el compromiso por parte de la gerencia empresarial, la identificación de las variables energéticas más importantes, la ejecución de auditorías energéticas y la implementación de actividades que contribuyan a la mejora de la eficiencia. Uno de los aspectos a destacar es la versatilidad de la norma, esto se debe a que se puede implementar en cualquier tipo de ambiente y actividad empresarial; lo cual posibilita su integración como un estándar a nivel global.

Otras de las particularidades de la norma ISO 50001 es que establece la importancia de hacer un uso sostenible de los recursos energéticos. También funge como una especie de ente regulador para fomentar la responsabilidad social, lograr una disminución de la huella de carbono y con esto disminuir el impacto al medio ambiente que conlleva el consumo de energía. En un escenario como el actual, la ISO 50001 constituye un instrumento de mucho valor a la hora de mejorar el desempeño energético de una organización y ayudar de esta forma a combatir los efectos de la contaminación medioambiental. Para la ejecución de la presente investigación, se hace uso de la norma ISO

50001:2018.

El inventario de equipos permite ventajas como la gestión de los activos de la planta ORC. Esto posibilita la identificación de los dispositivos y registrar sus características. De esta forma se establece un mejor control de ellos, además se estandariza el proceso de adquisición de recambios y a la hora de realizar una sustitución se tiene todos los detalles por parte del fabricante para adquirir un nuevo dispositivo que se acople de forma correcta al ciclo termodinámico.

El departamento energético a raíz de la auditoría dispone de la información de donde se encuentran instalados los equipos, esto hace que al momento de realizar un mantenimiento o alguna otra tarea se puede reducir el tiempo de búsqueda del dispositivo. Se establece también un procedimiento para ejecutar los mantenimientos tanto preventivos como correctivos, las inspecciones a la zona de operación de la planta ORC. Esto permite que se potencie la eficiencia en la operación y que a largo plazo se extienda la vida útil de los equipos.

La auditoría energética permite asentar un proceso para la identificación de equipos defectuosos o que no se encuentran en condiciones adecuadas de operación. También facilita que las normativas de seguridad se cumplan a cabalidad y mejora todo lo concerniente a temas de legalidad en cuanto a posibles actos delictivos y gestión de los activos.

4.2. Modelo PDCA

El modelo PDCA descrito en la norma ISO 50001:2018 es el pilar fundamental desde donde se sienta la base para un adecuado manejo de los recursos energéticos dentro de una instalación [74]. La figura 4.1 presenta sus líneas generales y las pautas generales de implementación de las mejoras energéticas para una organización en cada fase del ciclo. Para su uso en esta investigación se simplifica en función de los parámetros con los cuales cumple la entidad en cuestión.

4.2.1. Etapa de Planeación

Se realiza una revisión de la norma con el fin de comprender los requisitos y principios establecidos para comprender los resultados a esperar. Los objetivos energéticos son instaurados y se compromete a la empresa con la importancia de mejorar la eficiencia energética. Es elegido un responsable del departamento energético, el cual es la persona encargada de la implementación y puesta en marcha del SGE. Es importante desarrollar manuales y procedimientos para llevar a cabo actividades como la auditoría energética. Los indicadores de desempeño son establecidos para medir el rendimiento energético.

4.2.2. Etapa de Ejecución

Se ejecutan las actividades definidas en la etapa de planeación. Por lo cual es necesario realizar una auditoría energética con el fin de tener una imagen detallada de como se encuentran los indicadores energéticos dentro de la planta ORC. Esto se realiza de tal manera que, se identifican cuales son los equipos que consumen mayor cantidad de energía y que además se encuentran en un mayor período de funcionamiento.

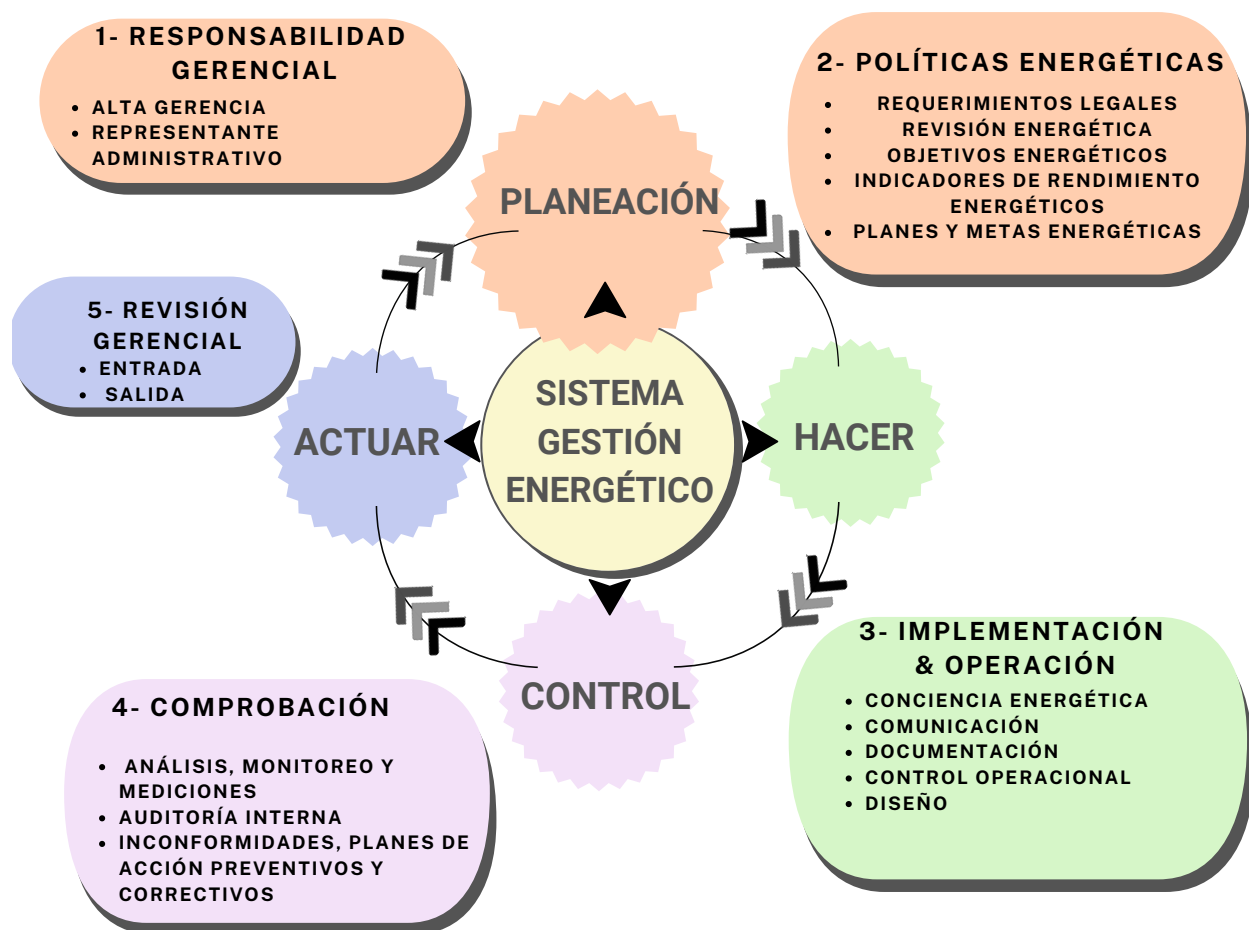


Figura 4.1. Modelo PDCA basado en la norma ISO 50001:2018 [75].

4.2.3. Etapa de Control

En este paso del ciclo se evalúan los resultados obtenidos en la etapa de ejecución. En caso de encontrarse contingencias se elaboran planes de acción. Además se verifica que todos los pasos aprobados para ejecución en las etapas anteriores se han realizados de forma adecuada. El estado de los indicadores energéticos es revisado en esta etapa.

4.2.4. Etapa de Actuar

En esta etapa se discuten las mejoras que se planean implementar en la planta ORC. Se realiza una revisión del cumplimiento del plan de actividades que se ha elaborado bajo las pautas establecidas por la norma ISO 50001:2018. De esto se desprenden dos líneas principales de trabajo:

- Corregir malas prácticas y tomar las medidas pertinentes con el fin de prevenir que vuelvan a ocurrir.
- Identificar nuevas áreas de oportunidad y desarrollar acciones o planes para mejorar los indicadores energéticos en las mismas.

4.3. Implementación cronológica de la norma ISO 50001:2018

El adecuado manejo del consumo de energía se realiza basado en las pautas descrita en la norma ISO 50001:2018 [76], lo que conlleva a una reducción en los costos energéticos de la planta ORC. Para la implementación se utiliza la estructura existente; esta se encuentra dividida en tres secciones principales:

- Calentador de aceite térmico alimentado con gas LP.
- ORC acoplado a generador eléctrico de 1 kW de potencia.
- Torre de enfriamiento.

Se establece un monitoreo del consumo de energía por sección, las horas de operación, el consumo de corriente específico de cada equipo; entre otras variables. Los datos tienen una frecuencia de muestreo de 5 minutos. La información recabada permite identificar las secciones donde se presenta un mayor consumo energético y determinar cuales son las áreas de mejora que pueden permitir mejorar la eficiencia energética de la planta ORC.

La tabla 4.1 muestra de forma cronológica la actividades a realizar para implementar en la medida que se cumplan los requisitos la norma ISO 50001:2018. Las actividades definidas se derivan del modelo presentado por [77] en su investigación.

En base a la información presentada en la tabla una auditoría energética y un sistema de gestión energético son propuestos. Las actividades descritas en el cronograma se cumplen a cabalidad para garantizar el cumplimiento del tiempo de implementación del SGE. Como se observa las etapas y acciones se encuentran divididas por meses.

De la implementación cronológica derivada del desarrollo de la metodología descrita en la tabla 4.1 se deriva un reporte energético de la planta ORC donde se muestra:

- Consumo eléctrico.
- Producción de electricidad.
- Identificación de áreas de oportunidad.
- Gráficas de consumo.

Con esta información se tiene una imagen completa de la situación energética de la planta ORC.

4.4. Analizador de redes eléctricas

Para obtener las mediciones de consumo energético en la planta ORC, es necesario el uso de un analizador de redes eléctricas. En aras de poner en marcha las mediciones se detallan a continuación un resumen de las características técnicas del analizador de red en la tabla 4.2.

Cuadro 4.1. Implementación cronológica de una auditoría energética basado en la norma ISO 50001:2018.

Lista de verificación	Meses												Actividades
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Fase 1 (Preparación)													
1 Revisión Departamental	*												El departamento energético confirma su compromiso con la implementación de la norma ISO 50001:2018
2 Selección equipo de trabajo	*												El departamento energético nombra a un supervisor para el control de las secciones de la planta ORC.
3 Revisión energética	*												El supervisor del departamento energético realiza la auditoria energética a la planta ORC.
4 Política energética	*												La norma ISO 50001:2018 establece las pautas generales a seguir por el supervisor energético para lograr los objetivos establecidos.
5 Establecer objetivos		*											Establecer los objetivos energéticos permite conocer las áreas donde se deben ejecutar las acciones y hacia donde el proyecto debe ser orientado .
Fase 2 (Planeación)													
6 Sistema de monitoreo			*	*	*	*							El uso de herramientas informáticas garantiza el almacenamiento y visualización de los parámetros eléctricos medidos.
7 Identificar grandes sistemas consumidores de energía (SCE)		*	*										El departamento energético debe identificar los grandes sistemas consumidores de energía al término de la auditoría energética.
8 Implementar indicadores energéticos				*									Establecer los indicadores energéticos indetificados en la auditoría energética.
Fase 3 (Hacer)													
9 Documentación				*	*	*	*	*	*				Los parámetros eléctricos medidos se presentan en un reporte energético.
10 Establecer el posible decrecimiento del consumo energético en SCE				*		*	*	*	*	*			El supervisor energético debe identificar y ejecutar las acciones que promuevan la reducción del consumo energético en los SCE.
11 Indicador esperado de la caída del consumo energético en la planta ORC							*						El departamento energético debe establecer los límites para el consumo energético.
12 Ejecución del plan de trabajo									*				Las medidas energéticas deben seguir la estrategia energética definida por el departamento energético.
Fase 4 (Control)													
13 Sistema de monitoreo									*				Validar el reporte energético.
14 Auditar la norma ISO 50001:2018										*			Las deficiencias e inconformidades deben ser redactadas al término de la auditoría.
15 Plan de acciones correctivas									*				Rectificar inconformidades.
16 Ejecutar plan de acciones									*				El supervisor energético recomienda evitar acciones para el siguiente período.
17 Control de registros									*	*			El departamento energético sugiere realizar un control de la política energética que contemple un período de 3 años.
Fase 5 (Actuar)													
18 Revisión departamental									*	*			Se recomienda necesario realizar un período de monitoreo de 6 meses antes de ejecutar acciones correctivas.
19 Retroalimentación de la revisión departamental										*	*		En caso de hacer una revisión de los objetivos energéticos la auditoría energética resultante y los indicadores energéticos deben ser actualizados.
20 Resultados de la revisión departamental										*	*		Los objetivos energéticos definidos por el departamento de energía deben ser los lineamientos generales en los cuales se basa la política energética de la planta ORC.

Realizar una evaluación de las diferentes opciones existentes en el mercado resulta lo más adecuado. Sin embargo en la práctica en muchas ocasiones se ejecutan las mediciones con los equipos existentes en las locaciones donde los estudios tienen lugar. Es importante tener en cuenta que el analizador sea capaz de ajustarse a las condiciones eléctricas del sitio donde se realiza la medición. Por otro lado la configuración adecuada del equipo permite recopilar de forma adecuada los parámetros eléctricos tales como, armónicos, factor de potencia, etc.

Es importante seleccionar un equipo que se adapte al entorno industrial específico donde va a realizar su operación. Esto permite la fiabilidad a la hora de establecer patrones y eventos anómalos que pueden incidir en la eficiencia energética. Se establece la necesidad de medir la calidad de la

energía, lo cual se realiza mediante el monitoreo de armónicos, picos de voltaje, el desbalance entre fases y otros parámetros. Además es necesario identificar cuando el caso lo requiera las posibles fuentes de las perturbaciones que afectan a la red eléctrica.

Con las mediciones obtenidas, se realiza un estudio donde como resultado se propone un plan de trabajo con el fin de mejorar la calidad de la energía y la eficiencia energética. Si el caso lo requiriera, se presentan soluciones técnicas que aboguen por cumplir con los objetivos energéticos establecidos.

Cuadro 4.2. Características técnicas analizador de red utilizado.

Circuito de alimentación		
Tensión de alimentación	V	De 24 a 240 V c.a/c.c De 48 a 240 V c.a/c.c
Rango de frecuencia	Hz	45 - 65
Precisión de las mediciones		
Tensión		$\pm 0,5 \text{ F.E} \pm 1 \text{ dígito}$
Corriente		$\pm 0,5 \% \text{ F.E} \pm 1 \text{ dígito}$
Frecuencia		$40.0 \div 99.9: \pm 0.2 \%$ $100 \div 500: \pm 0.2 \%$
Factor de potencia		$\pm 1 \% \pm 1 \text{ dígito}$
Potencia activa		$\pm 1 \% \pm 0.1 \% \text{ F.E}$
Energía activa		Clase 1
Rango de medición		
Tensión	V	De 10 a 500 aprox. TRMS VL-N
Corriente	A	De 50 mA a 5 A TRMS
Frecuencia	Hz	De 40 a 500
Factor de potencia		Visualización con 2 decimales

Con el fin de complementar el objetivo particular de establecer los requerimientos energéticos de la planta, se define la información necesaria a preparar. Esta etapa se encuentra culminada al definir en una tabla la cantidad de equipos y sistemas existente en la planta ORC y cuales son los requerimientos energéticos de cada uno.

4.4.1. Caracterización del comportamiento del R245fa

Con la planta ORC en funcionamiento, se realizan pruebas para caracterizar como se comporta el refrigerante en las diferentes condiciones de operación que se suceden en el ORC. Los datos obtenidos son utilizados para validar las condiciones de operación idóneas del sistema termodinámico. Resulta interesante evaluar el comportamiento del ORC en función del refrigerante que utiliza. Los datos obtenidos con el R245fa permite establecer una matriz de datos para compararlos con otros fluidos de trabajo y determinar cual es el refrigerante que mejores resultados obtiene con la planta ORC prototipo.

Para la utilización del fluido orgánico de trabajo se debe tener en cuenta diferentes parámetros, entre los cuales destacan, la relación de condensación y la presión de expansión del refrigerante. Identificar de forma adecuada los rangos óptimos permitiría maximizar la eficiencia de la planta ORC. Definir los costos asociados al uso del fluido de trabajo es sumamente importante, esto se debe

a que es necesario contar con un presupuesto de adquisición de consumibles y reposición de sistemas debido al uso. Además se debe evaluar que tan viable económicamente es utilizar un refrigerante u otro. Otro aspecto a tener en cuenta es el ambiental, debido a que el uso de refrigerantes se encuentra asociado a las sustancias que agotan la capa de ozono y de esta forma contribuyen al calentamiento del medio ambiente. Con el fin de realizar una evaluación adecuada del funcionamiento del fluido de trabajo R245fa es necesario establecer una bitácora de pruebas, donde se define cuales son las condiciones de operación del ciclo, los rangos de temperatura y presión adecuados para no operar el refrigerante fuera de su rango de operación.

4.5. Evaluación del fluido orgánico R245fa

Con el fin de evaluar el potencial impacto del R245fa en la planta ORC prototipo, esta investigación utiliza dos herramientas. La primera se basa en el uso de las leyes de la termodinámica; específicamente en la 1ra y 2da ley. La aplicación de estas leyes posibilita tener el basamento matemático necesario para comprender la implicación que tiene el uso de un fluido de trabajo específico a la hora de valorar la eficiencia térmica del ciclo. Esto se debe porque al analizar la ecuación 2.4 y aplicarla de forma separada a cada uno de los elementos que componen un ORC como son el generador de vapor, la turbina y demás equipos; se puede observar que al analizar el sistema en estado estacionario esta ecuación queda en función de la presión y temperatura existente en el refrigerante, que en este caso es el R245fa.

Cada fluido de trabajo tiene una entalpía específica a una temperatura y presión determinada, es por ello que al realizar el desarrollo de la ecuación 2.4 y buscar estos valores en las tablas se obtienen resultados diferentes y van aparejados al refrigerante que se encuentra en operación en la planta ORC; para el caso particular de la presente investigación es el R245fa. En este punto surge la otra herramienta necesaria para agilizar el proceso de aplicación de las ecuaciones; el software REFPROP 9.0 académico. Este programa permite obtener de forma ágil los parámetros que explican el comportamiento del R245fa bajo condiciones de presión y temperaturas específicas. Con su uso se obtienen los valores de entalpía, densidad entre otros de forma instantánea. Además es posible dibujar los diagramas que muestran el comportamiento del refrigerante. La figura 4.2 representa el diagrama T-s del fluido orgánico R245fa.

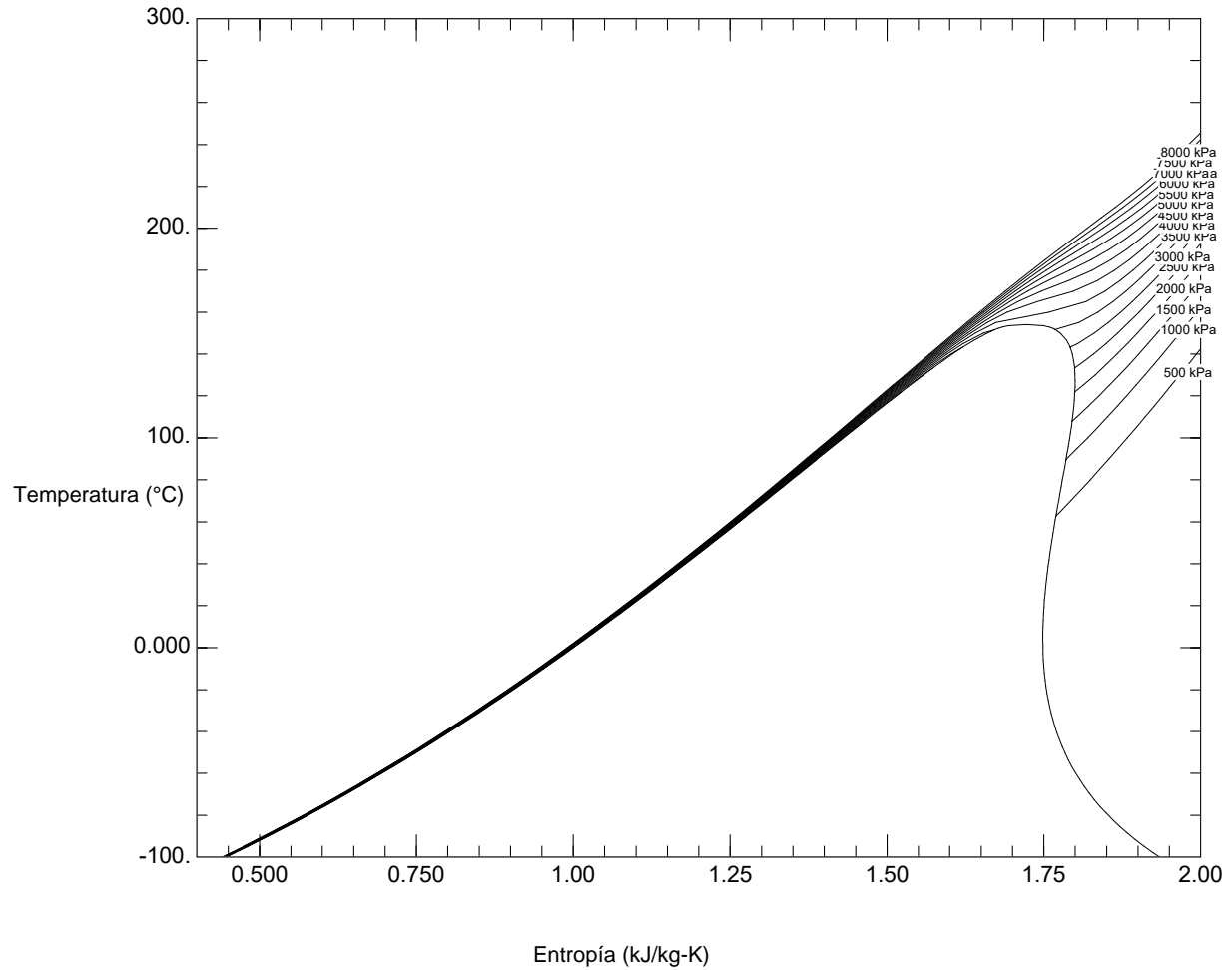


Figura 4.2. Diagrama temperatura (T) - entropía (S) refrigerante R245fa generado con software REFPROP 9.0 académico.

4.6. Sistema de captación solar

La elección de un sistema que utilice la radiación solar para producir energía que pueda ser utilizada en un ciclo termodinámico es un proceso donde se involucran varias tecnologías y se encuentra dividido por varias etapas. [78] en su investigación plantea que existen 5 tecnologías principales que utilizan la radiación solar para ser implementadas en un ORC, estas se presentan en la figura 4.3, 4.4 y 4.5.



Figura 4.3. Concepto general de sistema fotovoltaico.

4.6.1. Definición de requisitos y objetivos

Es necesario establecer los parámetros específicos que rigen el diseño, entre los cuales se puede citar el área disponible para instalar el sistema, la ubicación geográfica del sistema, la potencia energética necesaria y el presupuesto requerido para adquirir el sistema. Definir cuales son los objetivos energéticos que debe cumplir el sistema de captación solar, por ejemplo si es necesario el suministro de calor, energía eléctrica o una mezcla de ambos.

Para comenzar con el proceso de diseño es necesario incluir una búsqueda bibliográfica que permita establecer cuales son las tecnologías de captación solar que se pueden implementar en una planta ORC. Para ello se revisan los estudios relevantes en el tema en los últimos años puesto que esto permite tener cuales son la tendencias tecnológicas en el área dentro de la comunidad científica.

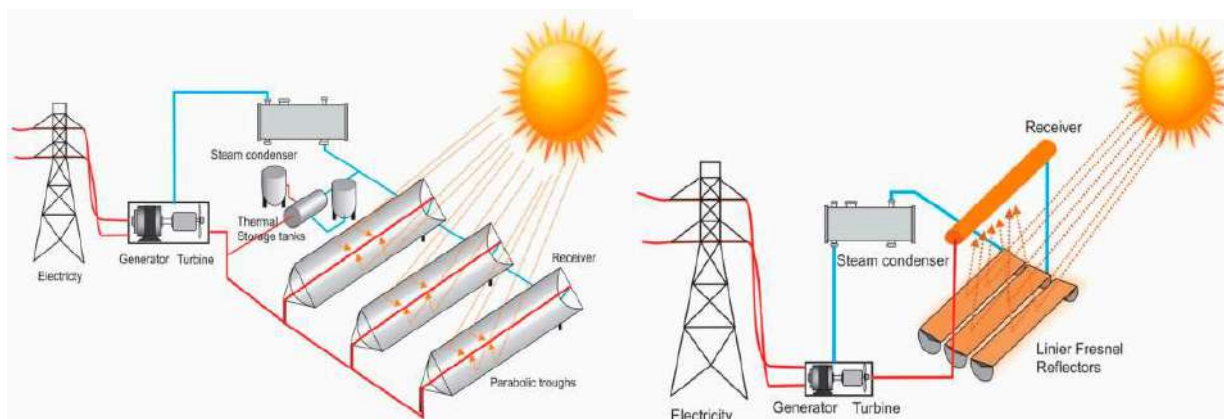


Figura 4.4. Concepto general de sistema cilindroparábólico y reflectores lineales Fresnel.

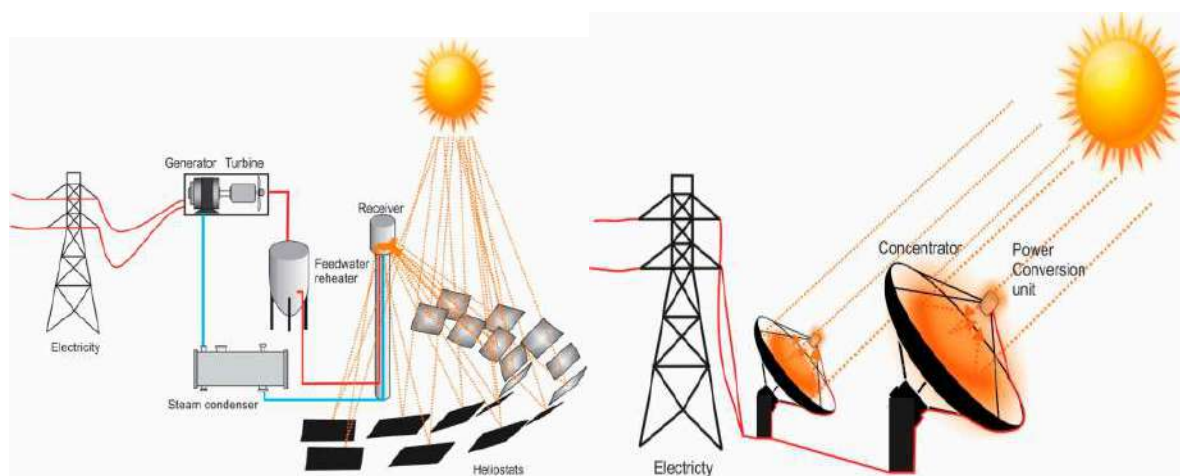


Figura 4.5. Concepto de sistema de torre solar y concentrador solar.

Para la determinación de la viabilidad geográfica sobre la cantidad de radiación solar disponible es necesario consultar la base de datos sobre radiación solarimétrica instalada en el centro meteorológico de la UAQ ubicada en las siguientes coordenadas 20.62, -100.36. En sus instalaciones se dispone de una amplia base de datos donde se pueden obtener los valores de radiación, nubosidad, tendencias de la radiación por meses del año. Esto permite dimensionar un sistema que pueda utilizar los recursos solares del área donde se realiza la investigación. De la bibliografía consultada se destaca que es necesario establecer las tecnologías que hacen uso del recurso solar para implementarse en una planta ORC. Entre las cuales destacan los concentradores solares, los reflectores lineales de Fresnel (LFR por sus siglas en inglés), los paneles fotovoltaicos (PV por sus siglas en inglés), los concentradores cilindroparabólicos, las torres solares y los sistemas híbridos; estos últimos se denominan a la combinación de algunas de las tecnologías antes mencionadas. La elección de alguno de estos sistemas para su uso en la planta ORC se aborda en las siguientes secciones.

La estimación de los costos de adquisición e instalación de un sistema que utiliza la radiación solar deben ser tomados en cuenta, debido a que el proyecto debe ceñirse al presupuesto con el que se cuenta. Es necesario establecer un análisis sobre la viabilidad económica, los costos de mantenimiento a lo largo de la vida útil del sistema. Los sistemas de captación solar en la información técnica provista por el fabricante establecen los valores de tensión, corriente nominal, de cortocircuito, potencia nominal, pérdidas térmicas y eficiencia de conversión entre otros parámetros. Resulta vital considerar esta información para realizar una adecuada explotación del sistema instalado. Otro factor a considerar es el impacto ambiental, mientras que el sistema se encuentra en uso pues a modo general son muchas las ventajas, pero luego del término de la vida útil es necesario realizar un manejo sostenible de los desechos (estructura, cables, inversores, celdas solares).

4.7. Criterio de selección para uso de radiación solar en planta ORC

Como se ha presentado en la sección 4.7 existen 5 tecnologías que aprovechan la radiación solar en sistemas termodinámicos. El cuadro 4.3 que se presenta a continuación resume los criterios a tomar en cuenta para la elección de una tecnología en específico para su posterior implementación en una planta ORC; como es el caso de esta investigación.

Cuadro 4.3. Pautas a considerar para la selección del sistema de captación solar.

Criterio	Aspectos a considerar
Eficiencia energética	Selección de sistema de captación solar con alta eficiencia en la conversión de la energía solar en energía térmica utilizable. De esta forma se garantiza se maximiza la cantidad de energía obtenida para suministrarla a la planta ORC
Tecnología de captación solar	Para la selección se toma en cuenta aspectos como la existencia de recursos locales, clima, tamaño del proyecto. Para un ORC, una opción interesante la constituyen los colectores solares térmicos debido a que pueden calentar directamente al fluido de trabajo del ciclo.
Temperatura requerida del fluido de trabajo	En función del fluido de trabajo utilizado es necesario un rango de temperatura para mejorar la eficiencia térmica del ORC. El sistema de captación solar seleccionado debe ser capaz de proporcionar esta temperatura de manera consistente.
Disponibilidad de recursos solares	Establecer que existe la disponibilidad de recursos solares en la ubicación del proyecto. Es necesario monitorear parámetros como la radiación solar promedio, la variabilidad estacional y diaria, así como la posible presencia de sombras.
Costo y viabilidad económica	Es necesario analizar los posibles beneficios contra el costo de instalación y operación del sistema de captación solar esperados, como el ahorro en combustible o electricidad. Además se necesita establecer los recursos financieros disponibles para proyectos de de esta envergadura.
Mantenimiento y durabilidad	Establecer el tiempo de vida útil del sistema de captación solar y el protocolo de mantenimiento con el fin de establecer el funcionamiento confiable durante un período prolongado, de esta forma se maximiza el retorno de la inversión.
Impacto ambiental	Comprender el impacto ambiental asociado con la fabricación, instalación y operación del sistema de captación solar. Es importante seleccionar tecnologías que minimicen el uso de materiales y la emisión de gases de efecto invernadero.
Flexibilidad y escalabilidad	El sistema de captación solar debe ser lo suficientemente flexible como para adaptarse a futuras expansiones o modificaciones de la planta ORC prototipo.

4.8. Ciclo Rankine Orgánico con sistema de captación solar

El adecuado acoplamiento del sistema de captación solar a la etapa de regeneración en la planta ORC es una etapa vital de la investigación. La validez de la metodología descrita comienza su validación en el punto que los resultados positivos surgan.

La metodología a cumplimentar en esta última etapa se define a continuación.

- Establecer los objetivos y parámetros a alcanzar con la integración de la etapa de captación

solar.

- Identificar en la bibliografía existente los casos de estudio que han abordado la temática y obtener la información pertinente y que se adecue a la presente investigación.
- Definir el sistema de captación solar que pueda ofrecer un rendimiento adecuado en base a las condiciones ambientales y técnica de la planta ORC existente.
- Definir mediante la consulta de base de datos (estación solarimétrica UAQ) la cantidad de radiación solar existente y la variabilidad estacional con el fin de optimizar el sistema de captación solar.
- Emplear herramientas informáticas con el fin de obtener posibles escenarios de funcionamiento tanto del sistema de captación solar como de la eficiencia energética de la planta ORC.
- Realizar un análisis matemático para obtener el estado de la transferencia de energía al ORC.
- Identificar áreas de oportunidad para ejecutar mejoras, tales como la posible adaptación de dispositivos y la compatibilidad de otros fluidos de trabajo con los parámetros de operación de la planta ORC.
- Definir los requisitos de operación del sistema de control, de seguridad y estabilidad en la operación.
- Ejecutar un análisis económico donde se considere los costos totales de la integración, operativos y de mantenimiento.
- Realizar una evaluación del tentativo impacto al medio ambiente que trae consigo la implementación y compararlo con el causado por soluciones convencionales u otras instalaciones del mismo tipo.
- Establecer un sistema de monitoreo constante de los parámetros de la planta ORC donde se incluyan los datos técnicos, de eficiencia, costos económicos, por mencionar algunos.

Para realizar la selección del sistema de captación solar, se establece la necesidad de revisar la bibliografía existente y encontrar cuales son las tecnologías existentes que mejor se acoplan a la planta ORC prototipo. Una forma de realizar el proceso consiste en analizar las tendencias existentes en cuanto a publicaciones referentes al tema dentro de la comunidad científica.

4.9. Validación de la experimentación

Se mide la temperatura, presión, flujo másico, velocidad de rotación de la turbina, y consumo de energía y con ello se determina el rendimiento del prototipo al variar el suministro de calor producido con el fluido de trabajo R245fa. Se realiza una recolección de datos con el sistema de instrumentación para guardarlos en archivos de extensión .csv para su posterior análisis.

El control de la válvula es del tipo PID de tal manera que se tiene una interacción entre el medidor de flujo másico, válvula reguladora de caudal tipo globo, transductor de presión y medidor de velocidad angular (rpm) del generador eléctrico; lo cual ocurre en el circuito del fluido de trabajo. Se mide la potencia eléctrica a la entrada de la planta ORC, es decir de la bomba de alta presión y a su vez se contabiliza la generación de potencia en la turbina.

4.9.1. Arranque del sistema

Condiciones previas al arranque (Nivel inspección o check list).

- Fluidos

- Se revisa el nivel de fluido térmico en el calentador de aceite térmico.
- Se revisa el nivel de gal LP en el tanque de gas LP.
- Se revisa el nivel de refrigerante en el ORC.
- Se revisa la presión de aire en el tanque acumulador del compresor de aire.

- Energía Eléctrica

- Se revisa nivel de tensión en tablero de la torre de enfriamiento y calentador de aceite térmico.

- Válvulas de paso en el prototipo de planta de potencia:

- Revisar la posición de las válvulas de paso, es decir, primero elegir con que configuración (simple o regeneración) se va a ejecutar la prueba experimental, debido a que las válvulas de paso se abrirán o cerrarán según sea el caso.

4.9.2. Arranque de periféricos

Condiciones para la habilitación de arranque del sistema:

- Posición del actuador de la válvula reguladora.
- Presión en el compresor.
- Se ingresa el punto de ajuste del termostato del calentador de aceite térmico. Se establece la temperatura en el evaporador (circulación de aceite térmico en un intervalo de 90°C a 110 °C).

Operación:

Una vez que se alcanza la velocidad de consigna se comienza a monitorear y registrar los datos de temperatura, presión y flujo y con ello el comportamiento del sistema y eficiencia del mismo. Al usar los datos del flujo másico, presión y temperatura con otros datos de entalpía se puede conocer la potencia térmica. El sistema de control deberá mantener la velocidad de rotación del generador según el punto de consigna o ajuste.

1. Se ingresan datos de fecha, hora y nombre de corrida.
2. Se establece un punto de ajuste set point en el sistema.
3. El medidor de flujo másico empieza a registrar el paso del fluido.
4. Se sensa la presión de saturación antes de la válvula reguladora de caudal.
5. Se retroalimenta con datos de presión en el actuador.
6. Se censa la velocidad angular.

7. La válvula reguladora de caudal recibe retroalimentación del sensor de presión antes de la válvula reguladora de caudal, del medidor de flujo másico y de medidor de velocidad angular; con el fin de modular la apertura del actuador y permitir que el giro de la flecha del generador se mantenga en un intervalo según el punto de ajuste previamente asignado al control PID.

4.10. Matriz de pruebas

Las pruebas se llevan a cabo con el fin de investigar el comportamiento térmico del sistema con el R245fa al variar condiciones de suministro de calor entre un intervalo de 80°C a 95 °C. Se ejecutan corridas de prueba; una será a una temperatura de 80 °C en el evaporador y manteniendo fija el rechazo de calor en 21 °C o la temperatura del bulbo húmedo del lugar y/o condiciones ambientales que se presenten en el día de la prueba. Se investiga el comportamiento del sistema al variar el flujo másico manteniendo fijo la presión de saturación de evaporación y observando la velocidad de giro del generador eléctrico y la salida de energía eléctrica del generador.

Otra prueba será a 90°C y otra a 95 °C manteniendo fija el rechazo de calor en 21 °C o la temperatura del bulbo húmedo del lugar y/o condiciones ambientales que se presenten en el día de la prueba. Se investiga el comportamiento del sistema al variar el flujo másico manteniendo fijo la presión de saturación de evaporación y observando la velocidad de giro del generador eléctrico.

Se analiza el grado de sobrecalentamiento y subenfriamiento contra rendimiento del sistema a la mejor condición de rendimiento de las tres pruebas anteriores antes mencionadas. Se estudia el rendimiento del sistema al medir el consumo de energía eléctrica tanto de suministro (bomba de alta presión) y salida de energía a una carga eléctrica (generador eléctrico y carga eléctrica). Además de la potencia térmica de entrada al evaporador.

Resultados y discusión

En el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos en la actual investigación. Se presentan los resultados de la auditoría energética y cuales son los principales indicadores energéticos. También se analizan las variables que influyen en el rendimiento térmico del ORC. Por último se presenta la tabla que valida los resultados obtenidos.

5.1. Requerimientos energéticos

La ejecución de la auditoría energética permite obtener información relevante acerca de la eficiencia, tiempo de funcionamiento y consumo de energía de la planta ORC prototipo. El cuadro 5.1 muestra un inventario de los equipos instalados en la planta ORC prototipo. Esto se deriva de la auditoría energética realizada bajo los lineamientos generales de la norma ISO 50001:2018.

Una ventaja de la aplicación de la norma ISO 50001:2018 es que se obtienen datos precisos del comportamiento de los equipos implicados en el funcionamiento de la planta ORC. Esto facilita la toma de decisiones en áreas como la inversión en nuevos dispositivos, en tentativas renovaciones o sustituciones. Cabe recalcar, que los procesos de mantenimiento mejoran en tiempo y calidad, esto se debe a toda la información actualizada y detallada que se obtiene a partir de la auditoría de cada equipo; lo cual permite mejorar la eficiencia operativa y disminuir los tiempos de parada.

Otra área impactada de forma positiva es la operativa. Se desarrollan procedimientos que permiten la identificación de ineficiencias en las tareas operativas, de esta forma se mitigan los costos asociados a la operación de la planta y por tanto se potencia la eficiencia operacional. También se implementa una visión donde el operario de la planta tiene un amplio conocimiento de los equipos bajo su responsabilidad, lo que permite establecer una operación de los dispositivos dentro de su rango nominal de operación.

Al establecer procedimientos donde se regula los tiempos de explotación de los equipos, sus rangos de operación, la estabilidad en el personal operativo, se potencia el seguimiento del comportamiento de los equipos; esto se debe a que se identifica de forma adecuada el estado de los equipos, su obsolescencia y su estado actual. Esta información es vital a la hora de planificar un posible reemplazo de los dispositivos.

La figura 5.1 muestra el diagrama de instrumentación instalado en la planta ORC. Los sistemas de adquisición de datos permiten obtener en tiempo real las mediciones de temperatura, presión y otras variables. Estos datos se monitorean leyendo los instrumentos en sitio y también en el

Cuadro 5.1. Listado de equipos planta ORC.

IDENTIFICADOR	EQUIPO	DESCRIPCIÓN
ESG-400	Scroll	Expansor Scroll Semihermético de 1 kW
		Generador eléctrico 2.5 kW 115 Vac 60 Hz 3600 rpm
EVA-300	Evaporador	Intercambiador de calor de placas Marca Alfa Laval modelo ACH-70X-42M S24 de Potencia térmica de intercambio de 14 kW y con área de intercambio de calor de 2.04 m ² . Requerimiento de caudal de aceite térmico Mobiltherm 603 de 95 lpm DT 20 °C.
CON-500	Condensador	Intercambiador de calor de placas Marca Alfa Laval modelo ACH-70X-62M S25 de Potencia térmica de intercambio de calor de 17 kW y con área de intercambio de calor de 3.06 m ² . Requerimiento de agua de 113 lpm DT 7 °C.
REG-200	Regenerador	Intercambiador de calor de placas Marca Alfa Laval modelo ACH-30EQ-50H-F S21 de Potencia térmica de intercambio de calor 1.81 kW y con área de intercambio de calor de 1.10 m ² .
EVAP-SOL	Precalentador	Intercambiador de calor de placas Marca Alfa Laval modelo ACH-30EQ-20H-F de Potencia térmica de intercambio de calor de 3.3 kW y con área de intercambio de calor de 0.41 m ² .
TLR-600	Recibidor de líquido	Tanque recibidor de líquido. Marca Alfa Laval. Modelo UV30-410. De capacidad de 13 kg.
BAP-100	Bomba de alta presión	Tipo paletas deslizantes Marca Procon Modelo 01070R11GA190 y acoplado a motor eléctrico Modelo 806. Requerimiento de caudal de refrigerante de 6 lpm a 30 °C.
BRR-01	Bomba de recirculación	Bomba Pentair Shurflo 115 Vac 0.9 A 12.5 lpm
CAL-800	Generador de vapor	Calentador de aceite térmico marca Ciclonik modelo CL-20. Capacidad 30000 kcal/h. Combustible a gas LP. Soplador de 0.15 kW. Consumo de gas LP: 5 L/h. Presión: 30 mbar.
TEXP-330	Depósito de aceite	Tanque de expansión con capacidad de 80 litros.
BC-310	Bomba aceite térmico	Bomba circuladora de fluido térmico de 2.2 kW. 220 VCA 3 PH Capacidad de bombeo de 25 gpm (1.27 kg/s). Presión 2kg/cm ²
FLM-320	Instrumentación de campo	Caudalímetro para aceite térmico
TE-480	Sumidero de calor	Torre de enfriamiento de tipo paquete y tiro a contracorriente. Capacidad 7.5 toneladas de refrigeración. Caudal: 25 gpm (0.94 L/s). Material de pared: fibra de vidrio. Material de relleno: PVC.
BTG-430	Electroventilador	Motor ventilador: acople directo. $\frac{3}{4}$ HP 220 Vac 3 fases
BC-420	Bomba torre de enfriamiento	Bomba circuladora de agua fría Capacidad de bombeo de 25 gpm 220 vca 3 fases 2 HP
PV-01	Inversor	Inversor Sunny Boy bifásico 220/110 Pmax. 9 kW. 14 Paneles 0.18 kW 8.3 A Vn. 28.5 Vdc

sistema de visualización que se encuentra en la planta ORC. A continuación se detallan los puntos de medición:

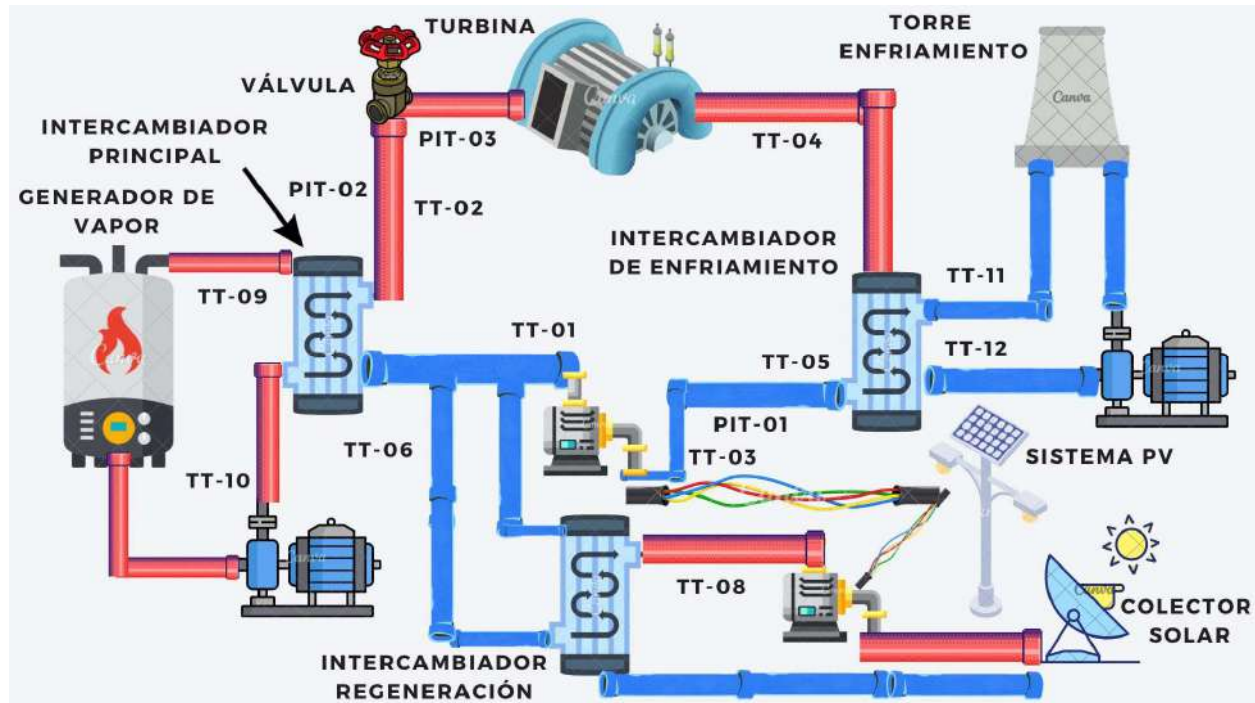


Figura 5.1. Diagrama de instrumentación de la planta ORC.

- TT-01: Transmisor de temperatura para el fluido de trabajo a la salida de la bomba de alta presión.
- TT-02: Transmisor de temperatura para el fluido de trabajo a la salida del intercambiador principal de calor.
- TT-03: Transmisor de temperatura para el fluido de trabajo a la entrada de la bomba de alta presión.
- TT-04: Transmisor de temperatura para el fluido de trabajo a la salida de la turbina.
- TT-05: Transmisor de temperatura para el fluido de trabajo a la salida del intercambiador de calor de condensación.
- TT-06: Transmisor de temperatura para el fluido de trabajo a la salida del intercambiador de regeneración.

- TT-08: Transmisor de temperatura para circuito de agua caliente a la entrada del intercambiador de regeneración.
- TT-09: Transmisor de temperatura para aceite térmico a la salida del generador de vapor.
- TT-10: Transmisor de temperatura para aceite térmico a la entrada del generador de vapor.
- TT-11: Transmisor de temperatura para agua fría a la entrada de la torre de enfriamiento.
- TT-12: Transmisor de temperatura para agua fría a la salida de la torre de enfriamiento.
- PIT-02: Transmisor de presión para el fluido de trabajo a la salida del intercambiador principal de calor.
- PIT-03: Transmisor de presión para el fluido de trabajo a la entrada de la turbina.
- PIT-01: Transmisor de presión para el fluido de trabajo a la entrada de la bomba de alta presión.

El sistema de medición es capaz de brindar la información necesaria para poder realizar un monitoreo adecuado de las variables eléctricas de la planta ORC.

5.2. Uso de refrigerante R245fa

De los resultados derivados de la auditoría se establece que la turbina instalada en la planta ORC prototipo es compatible con 2 fluidos orgánicos, R245fa y R134a. En función de las características termofísicas, parámetros de diseño, costos y logística asociada a la adquisición del refrigerante se opta por trabajar con el R245fa.

El R245fa presenta propiedades termodinámicas como un punto de ebullición 15.13 °C y una temperatura crítica de 154.8 °C. Estas características le permite operar de forma eficiente en los intervalos típicos de temperatura y presión donde se desenvuelven los ciclos Rankine. Otro factor tomado en consideración es el coeficiente de rendimiento volumétrico y térmico, esto no es más que la capacidad de transferencia del sistema de captación solar al refrigerante en uso en la planta ORC, para este estudio R245fa; lo cual potencia la eficiencia térmica del ciclo.

Por los elementos utilizados en la fabricación del R245fa, este se convierte en un refrigerante noble en cuanto a su compatibilidad con los circuitos de refrigeración presentes en una planta ORC prototipo; donde normalmente estos son construidos usando cobre. Este escenario tiene implicaciones favorables en cuanto a la selección de componente, costos de fabricación y mantenimiento. Una característica importante es la no toxicidad y flamabilidad del refrigerante, esto posibilita una mayor seguridad en su manipulación a la hora de cargarlo en un ORC. Estas condiciones positivas se mantienen en el terreno de la química y el medioambiente, lo que hace que el impacto negativo se vea reducido. En la rama industrial el refrigerante R245fa es ampliamente utilizado y desde el punto de vista comercial es de fácil acceso, aunque el costo es un poco elevado comparado con otros productos similares.

Para evaluar el rendimiento del fluido de trabajo R245fa se utiliza el software REFPROP 9.0 académico. Con este se logra obtener los valores de entalpía, densidad y otras propiedades del fluido de trabajo. De esta forma con las mediciones adquiridas del sistema de instrumentación se calculan utilizando las ecuaciones de balance de masa y energía los estados termodinámicos que a la

postre permiten evaluar el rendimiento térmico del ORC. Los cálculos realizados para determinar el rendimiento del uso R245fa se aborda con mayor detenimiento en la sección 5.4.

5.3. Sistema de captación solar

La figura 5.2 presenta el sistema de captación solar acoplado a la planta ORC. El dispositivo cuenta con un espejo cóncavo conformado por 236 piezas de cristal con forma de triángulo, sobre las cuales inciden los rayos solares y estas enfocan el reflejo sobre una tubería de cobre de 1/2" de grosor.



Figura 5.2. Colector solar acoplado a etapa de regeneración en planta ORC.

El flujo de agua a través de las tuberías es de 12 lpm y este se realiza utilizando una bomba de 0.25 HP. El colector solar provee la potencia calórica necesaria para calentar el agua y enviarla por el intercambiador de calor de la etapa de regeneración, esto provoca que la energía necesaria para precalentar el fluido de trabajo R245fa en esta etapa proviene de energía renovable y en este caso particular provista por el Sol. Lo que permite que el fluido de trabajo cuando va a ingresar al intercambiador principal, siempre y cuando el ORC se encuentre en modo de operación regeneración, sea mayor. Por ende la potencia calórica provista por el generador de vapor sea menor para llevar el refrigerante al punto de temperatura de operación y de esta manera se disminuya el consumo de gas LP, lo que trae consigo un ahorro de portadores energéticos provenientes de fuentes de

combustibles fósiles. El acoplamiento del colector solar al ORC se realiza mediante un sistema de mangueras que permite la circulación del agua mediante el circuito de calentamiento existente en el intercambiador de calor de la etapa de regeneración hacia el sistema de serpentín instalado en el colector solar. Cuando el punto focal obtenido del espejo cóncavo se direcciona sobre la tubería de cobre se obtiene una temperatura en la tubería de hasta 180 °C, lo que provoca que con el paso del agua a través de este se obtiene un calentamiento satisfactorio.

5.4. Mediciones de variables planta ORC

Para la adquisición de las mediciones se utiliza el sistema de sensores instalados y herramientas de medición ubicadas en zonas específicas con el objetivo de elaborar un panorama completo del desempeño de la planta ORC.

Cada ciclo de trabajo tiene una duración de 1 hora y un tiempo de muestreo de 5 minutos. Con los datos recabados se establece una media de los datos debido a que el volumen de mediciones es elevado.

Se establecen dos escenarios para la ejecución de las mediciones:

- Ciclo Rankine orgánico operando en modo simple.
- Ciclo Rankine orgánico operando en modo de regeneración.

La instrumentación es capaz de monitorear todas las variables necesarias para realizar una correcta operación de la planta ORC como se muestra en la figura 5.3. En esta se obtiene una imagen completa de los sistemas en operación en la planta ORC prototipo. El levantamiento de la información permite establecer una imagen precisa de los sistemas instalados y como se encuentran interconectados entre ellos.

El cuadro 5.2 muestra datos técnicos de diseño del sistema ORC. Estos permiten establecer los rangos de operación nominal bajo los cuales fueron diseñados los dispositivos instalados. Mantener el funcionamiento dentro de los intervalos permite establecer la seguridad en la operación y la validez de los resultados, puesto que al encontrarse la puesta en marcha dentro de valores nominales el rendimiento obtenido no se hace cuando la planta ORC se opera en condiciones de sobrecarga. El cuadro se obtiene de realizar la auditoría energética como parte del uso de la norma ISO 50001:2018. La información obtenida es de gran ayuda porque provee los datos del fabricante, especificaciones de los equipos; lo que permite optimizar las labores de mantenimiento tanto preventivo como correctivo.

Cuadro 5.2. Parámetros técnicos de la planta ORC.

TAG	EQUIPO	PARÁMETRO TÉCNICO	FLUIDO DE TRABAJO
ESG-400	Turbina sin Lubricación	Eficiencia	0.6
		Fluido de trabajo	R245fa
		Flujo másico del fluido de trabajo	0.08 kg/s
		Desplazamiento	14.5 cm ³ /rev
		Velocidad. La velocidad máx. es de 3600 rpm	3500 rpm
		Presión de entrada. La presión máx de operación es 13.8 bar abs	11.8 bar man
		Temperatura entrada 110 °C. Sobrecalentamiento 10 °C	110 °C
		Presión de salida	5.1 bar
		Temperatura salida	60 °C
EVA-300	Evaporador	Temperatura de evaporación	100 °C
		Presión de evaporación	11.66 bar man
		Temperatura de entrada al evaporador	30 °C
		Potencia térmica del evaporador	14 kW
		Área de transferencia de calor	2.04 m ²
		Fluido de transferencia de calor lado evaporador	MobilTherm 603
		Caudal del aceite térmico	1.27 kg/s
		Temperatura de entrada al evaporador del aceite térmico	120 °C
		Temperatura de salida al evaporador del aceite térmico	100 °C
		Potencia eléctrica de la bomba de circulación	1.1 kW
CON-500	Condensador	Temperatura de condensación	30 °C
		Presión de condensación	1.8 bar
		Temperatura de entrada del fluido orgánico al condensador	45 °C
		Potencia térmica del condensador	17.5 kW
		Área de transferencia de calor	3.06 m ²
		Fluido de transferencia de calor lado condensador	Agua
		Caudal del agua de enfriamiento	0.94 kg/s
		Temperatura de entrada al condensador del agua de enfriamiento	28 °C
		Temperatura de salida al condensador del agua de enfriamiento	23 °C
		Potencia eléctrica de la bomba de circulación	0.745 kW

Cuadro 5.3. Continuación.

TAG	EQUIPO	PARÁMETRO TÉCNICO	FLUIDO DE TRABAJO
REG-200	Regenerador	Potencia térmica del regenerador	1.812 kW
		Área de transferencia de calor	1.1 m ²
		Temperatura entrada fluido caliente	61 °C
		Temperatura de salida fluido caliente	45 °C
		Temperatura entrada fluido frio	30 °C
		Temperatura salida fluido frio	60 °C
TLR-600	Recibidor de líquido	Cantidad de refrigerante en el sistema, kg	8 kg
		Volumen	80 lts
BAP-100	Bomba de alta presión	Paletas	12
		Presión de descarga	11.56 bar
		Caudal de la bomba	0.1 L/s
		Potencia eléctrica del motor	260 W
		Presión de succión	1.36 barg
	Refrigerante	R245fa cilindro de 45 kg.	R245fa

El cuadro 5.4 muestra la instrumentación de campo para garantizar la adquisición de forma correcta de las variables. Este sistema permite realizar una monitorización constante de las variables, lo que facilita la toma de decisiones. De esta manera se pueden detectar de forma temprana anomalías que a largo plazo tienen un impacto positivo en el rendimiento y eficiencia de la planta ORC. El sistema de sensores instalados brinda la posibilidad de medir y controlar el consumo energético en la instalación, lo que trae como beneficio la mejora en la eficiencia energética. También establece la posibilidad de automatizar procesos puesto que al visualizar datos en tiempo real se pueden implementar lógicas de automatización.

Contar con un sistema de instrumentación ofrece una manera eficaz de realizar seguimiento y de documentar las variables críticas involucradas en el proceso, de esta forma se asegura un proceso de medición confiable y que mantiene los estándares de calidad dentro de las normativas industriales. A modo general los sensores y dispositivos instalados permiten crear una imagen detallada del funcionamiento de la planta ORC, debido a que ofrecen datos verídicos que ayudan a realizar un control más efectivo.

Para la realización de las pruebas se manipulan las válvulas del ORC de modo que el sistema se encuentre operando en régimen simple y en regeneración en función de la prueba que se ejecute. La figura 5.4 muestra el mapa de válvulas instalados para una correcta operación dentro del ORC en el momento de cambiar el modo de operación. Recaltar que, al momento de manipular estos periféricos es necesario tomar las precauciones y medidas de seguridad adecuadas, debido a que en algunos casos pueden encontrarse calientes. Es por ello que se dispone en las normas de operación, que los cambios de estas se deben realizar solamente cuando la planta no se encuentra en operación.

En el mapa se muestran de forma esquemática en que posición se encuentran instaladas las válvulas en las diferentes configuraciones. El diagrama es preciso y de mucha ayuda a la hora de brindar la información a los operarios sobre en que zona de la planta ORC deben operar. El plano se elabora con la información recabada en la auditoría energética como parte de la implementación

Cuadro 5.4. Instrumentos de medición de temperatura, presión, flujo másico y variables eléctricas.

VARIABLE	CANT.	SENSOR	INTERVALO DE MEDICIÓN
Temperatura	14	Transmisor de Temperatura (TT-01-TT13), RTD 4 hilos, Con termopar de Acero Inoxidable 316L, Longitud de Inserción: 80mm, Conexión eléctrica 1/2" NPT-H	0 a 350 °C
Presión	2	Transmisor de presión, Rango 0-16Barg, Precisión 0.04 % de la variable leída, Alimentación: 24VCD, Salida: 4- 20mA + HART (2 Hilos), con Manifold en Acero Inoxidable con conexión a proceso 1/2"NPT-H, TAG: PIT- 01	0 a 16 barg
Flujo másico	1	Transmisor de flujo tipo Coriolis, Conexión a proceso 1/2", Sensor de 1/2. ^{en} Acero Inoxidable 316L, Brida RF en 316L, Remoto con 5m de cable, precisión 0.1 % de la variable leída, Salida 1: 4-20mA + Hart, Salida 2: Corriente/Pulsos	0 a 1 kg/s
Eléctricas	1	Analizador de redes eléctricas	100 - 480 V c.c 59.4 - 60.6 Hz 0 - 150 A
Eléctricas	1	Multímetro Fluke	100 - 480 V c.c 59.4 - 60.6 Hz 0 - 100A

de la norma ISO 50001:2018. Se utiliza la simbología que marcan los estándares para este tipo de plano, con el fin de la información se muestre de la forma adecuada para los técnicos afines a tareas de mejoras y mantenimiento en la planta prototipo.

A continuación en el cuadro 5.5 se detallan las válvulas que se deben manipular en función de la prueba a ejecutar. Establecer la posición correcta de las válvulas en función del modo de operación escogido es de suma importancia porque permite un manejo eficiente y seguro del sistema industrial. Un manejo inadecuado de la válvula puede desatar condiciones peligrosas de operación, como por ejemplo fugas y sobrepresiones. La manipulación correcta posibilita mantener la seguridad de los operadores y la integridad de la instalación.

Con su manipulación se ajusta la cantidad de fluido de trabajo que circula por el sistema, lo que permite potenciar la eficiencia al no dar lugar a fugas innecesarias. Otro aspecto a tener en cuenta, es que una incorrecta operación puede destruir o al menos reducir la vida útil de la válvula. Es por ello que se deben cumplir las recomendaciones del fabricante para una adecuada manipulación.

Establecer un procedimiento para garantizar el cierre por completo de la válvula minimiza la posibilidad de una fuga y de paso se garantiza la seguridad del sistema. También es necesario señalar que existen estándares de operación para los fluidos de trabajo, es por ello que realizar un adecuado manejo del sistema de válvulas permite cumplir con los requisitos y especificaciones establecidas para un fluido de trabajo determinado.

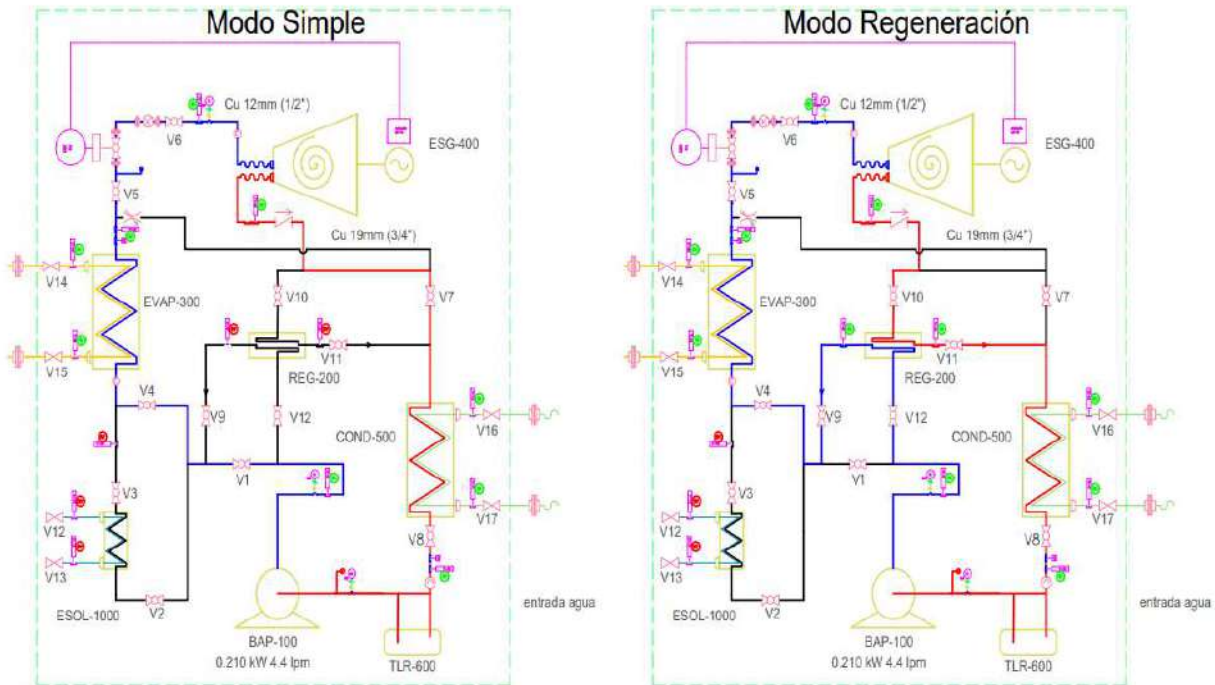


Figura 5.4. Mapa de válvulas modo simple y regeneración.

La operación inadecuada puede incurrir en desperdicio de energía, mantenimientos correctivos no programados o tiempos de parada no calendarizados. Esto se puede evitar en muchos casos al cumplir con las normas de operación. En un entorno industrial cumplir las normas garantiza la adaptabilidad del sistema a fluctuaciones por ejemplo en la demanda u condiciones de operación.

En el caso del cuadro 5.4 se muestran las posiciones en las que se deben establecer las válvulas para ejecutar los diferentes modos de trabajo de la planta ORC. Es necesario notar que existen dos tipos de accionamientos, válvulas de bola y de compuerta. La forma de manipulación para ambas es la misma solo cambia la forma de su estructura mecánica. Recalcar que, los accionamientos de estos dispositivos son manuales en todos los casos.

Notar que en el caso de la planta operando en modo simple se accionan menos válvulas que cuando se ejecuta en modo regeneración. Esto se debe a que en modo simple solo interviene un intercambiador de calor, la caldera, la turbina, la bomba de alta presión y la torre de enfriamiento; en el caso de la regeneración a ese grupo de equipos se le agrega otro intercambiador de calor y otra bomba. Lo que trae consigo que se deban operar otros circuitos hidráulicos por lo cual se debe operar una mayor cantidad de válvulas.

Un último aspecto es que realizar de forma sostenida en el tiempo una correcta operación de las válvulas le brinda a los operarios la confianza en la operación del sistema. Esto se debe a que confían en que estas operan de forma segura y predecible. En función del modo de operación del

Cuadro 5.5. Configuración de las válvulas para diferentes modo de operación.

Modo de operación	Posición de las válvulas de bola										Posición de las válvulas de compuerta						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Simple	A	C	C	A	A	A	A	C	C	C	A	C	C	C	A	A	A
Regeneración	C	C	C	A	A	C	A	A	A	A	A	C	A	C	A	A	A
A = ABIERTA C = CERRADA																	

ORC, se obtienen mediciones de las variables eléctricas y también de las relacionadas con el fluido de trabajo.

5.5. Integración de sistema de captación solar

Como se ha descrito en epígrafes anteriores la planta ORC consta de varios sistemas entrelazados entre sí y que funcionan como un todo, tal y como muestra la figura 5.5.

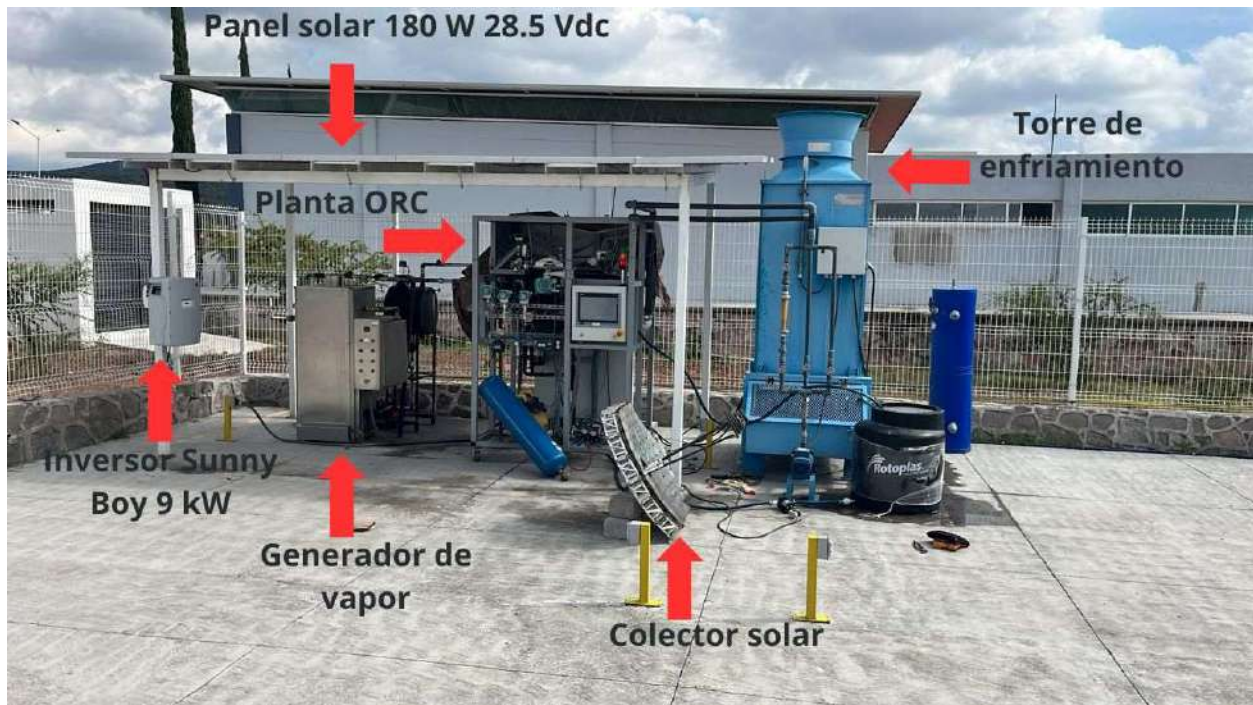


Figura 5.5. Planta ORC prototipo con sistema solar.

Como se observa en la figura 5.5, se muestran 3 módulos principales que componen la planta ORC, el generador de vapor, el módulo ORC con el colector solar y por último la torre de enfriamiento. El módulo 1 y 3 forman parte original del ORC y como parte del desarrollo de la investigación, se agrega el módulo 2 que viene siendo el sistema de captación solar. Para realizarlo desde el punto de vista estructural y mecánico se ubicaron las secciones dentro de la planta ORC donde podían ingresar el sistema de mangueras que viene acoplado al colector solar.

Como se ha explicado, el sistema de captación solar se implementa en el intercambiador de calor de la etapa de regeneración, por lo cual los trabajos mecánicos necesarios para integrarlo de forma satisfactoria consisten en; selección de acoples, corte de tubería de cobre, elección del material de fabricación de la manguera para que pueda circular de forma segura el agua caliente a través de ella. Instalación eléctrica para proveer de potencia a la bomba que realiza el trabajo de mover el agua a través de todo el circuito; es decir, desde el intercambiador de calor de la etapa de regeneración hasta el serpentín en el colector solar.

Cuadro 5.6. Medición de variables planta ORC en régimen de trabajo simple.

Sensores de temperatura			Sensores de presión			Flujo másico	Calor entrada	Entalpia		Eficiencia
Temp. TT-03 °(C)	Temp. TT-04 °(C)	Temp. TT-05 °(C)	Pit-01 (kPa)	Pit-02 (kPa)	Pit-03 (kPa)	\dot{m} (kg/s)	Q_{in} (kW)	h_{in} (kJ/kg)	h_{out} (kJ/kg)	η_{ter} (%)
71.6	42.6	27.3	52.3	75.6	67.5	0.034	34.89	469.02	442.25	1.79
72.1	42.1	27.4	52.9	76.4	67.9	0.036	34.89	469.49	441.78	1.79
70.9	41.9	26.8	54.5	73.9	68.1	0.033	34.89	468.33	441.55	1.79
71.2	40.9	26.2	54.6	74.6	68.6	0.041	34.89	468.61	440.64	1.79
73.4	43.5	28.1	55.9	74.5	69.8	0.039	34.89	470.7	442.97	1.79
72.6	44	29.3	56.2	75.1	70.2	0.038	34.89	469.92	443.42	1.79
72.4	41.9	26.5	57.4	73.9	67.3	0.043	34.89	469.79	441.47	1.79
73.1	43.8	27.4	53.9	74.8	67.5	0.045	34.89	470.45	443.3	1.79
70.2	42.5	26.9	52.4	75.9	68.4	0.041	34.89	467.66	442.16	1.79
72.3	40.8	24.5	51.5	76.1	69.4	0.039	34.89	469.65	440.63	1.79
74.6	42.5	27.9	56.3	74.2	68.6	0.038	34.89	471.88	442.05	1.79
72.6	43.7	28.4	54.3	75.6	67.4	0.037	34.89	469.98	443.2	1.79
71.8	44.5	29.3	56.3	75.3	68.4	0.046	34.89	469.19	443.88	1.79
70.8	42.3	27.6	54.9	76.4	69.5	0.045	34.89	468.21	441.91	1.79
71.4	41.5	26.3	58.7	76.3	67.6	0.044	34.89	468.82	441.07	1.79
72.6	42.7	27.9	56.3	74.8	68.6	0.033	34.89	469.95	442.23	1.79
71.4	45.1	30.4	52.3	75.9	67.4	0.035	34.89	468.83	444.53	1.79
72.3	43.6	27.3	54.8	76.2	69.2	0.038	34.89	469.66	443.1	1.79
72.5	42.8	26.9	55.6	75.4	68.2	0.042	34.89	469.87	442.34	1.79
73.1	43.1	26.7	57.4	74.7	67.9	0.04	34.89	470.45	442.57	1.79
72.15	42.79	27.46	54.93	75.28	68.38	0.039	34.89	469.52	442.35	1.79

1

El cuadro 5.6 muestra la mediciones promedio de la planta ORC en modo de operación simple. Los datos mostrados se obtienen del sistema de instrumentación instalado. Las mediciones de

temperatura, presión y flujo másico se obtienen directamente de la instrumentación instalada y donde se detallaron los equipos en el cuadro 5.3. En el caso del calor de entrada se toman los datos del fabricante para cuantificar la potencia entregada por la fuente de calor. Las mediciones tienen un tiempo de muestreo de 5 minutos para no almacenar un volumen de datos muy grande. Los valores que se muestran son una media de los valores obtenidos durante un ciclo de operación.

El ciclo de operación es una corrida que dura una 1 hora y donde se evalúan en función del modo de operación el comportamiento de las variables. Para comparar los resultados se establecen las mismas condiciones para los diferentes modos de funcionamiento (simple y regeneración). Los valores de entalpía se obtienen al introducir en el software REFPROP versión 9.0 académico las mediciones de temperatura y presión junto con el fluido de trabajo que se encuentra en la planta ORC, que para el caso en cuestión es el R245fa. Para realizar los cálculos de eficiencia se toman los datos de chapa proporcionados por el fabricante de la turbina que es de 1 kW y de la bomba de alta presión de 0.375 kW. La eficiencia térmica se calcula finalmente utilizando la ecuación 2.12.

El cuadro 5.7 muestra la toma de muestras realizadas para el modo de regeneración. Es importante notar que como se ha explicado con anterioridad en regeneración se manipulan más equipos y válvulas. En la figura 5.3 y 5.5 se puede observar de forma detallada cual es el proceso necesario de operación. Los datos del cuadro 5.6 se obtienen cumpliendo las mismas condiciones y tiempos de operación que se siguieron para el caso de modo de operación simple. Esto permite validar los resultados obtenidos debido a que se compara el rendimiento en las mismas condiciones.

Para la obtención de los valores relacionados con el Q_{in} se realiza un procedimiento donde se toman los datos del fabricante de la caldera, el equipo tiene un consumo de 5 litros de gas por hora de funcionamiento. Con el fin de calcular la potencia calórica proporcionada se mide el tiempo de funcionamiento de este equipo durante la duración de un ciclo de trabajo. Luego se procede a realizar una linealización porque el control de la válvula de gas es ON-OFF, lo que significa que siempre que se encuentra en operación entrega el máximo caudal de gas. Para el cálculo del W_{tur} se utiliza la ecuación 2.7, donde en función de las temperaturas y presión de entrada y salida del fluido de trabajo en la turbina se calculan las entalpías y de esta forma se puede obtener el trabajo producido. Para el caso del trabajo consumido por W_{bap} y W_{brgn} , este se calcula utilizando el analizador de red y pinza amperimétrica; de esta forma se mide el consumo de corriente, la tensión aplicada y con el dato del factor de potencia proporcionado por el fabricante se obtiene la potencia consumida. Con todos los datos obtenidos se procede a aplicar la ecuación 2.12 y se calcula la eficiencia térmica de la planta ORC en modo regeneración.

Los datos mostrados en los cuadros anteriores establecen las relaciones que existen entre los dos regímenes de trabajo que aborda la presente investigación. Como se puede observar existe una mayor eficiencia térmica cuando la planta ORC funciona en modo de regeneración. Como se muestra en el cuadro 5.7 el valor de la Q_{in} no varía, lo cual en la práctica no sucede debido a que existen pérdidas asociadas a un proceso termodinámico, pero para el curso del presente estudio se realizan algunas presunciones. En este caso el valor en cuestión corresponde a la potencia que entrega la caldera durante una hora de operación y para esto se utiliza el dato provisto por el fabricante como se ha comentado anteriormente. Al realizar un análisis de la ecuación 2.12, se tienen todos los valores para calcular la eficiencia térmica.

Esto se debe a que el fabricante de la turbina establece cual es la potencia nominal que ofrece la turbina, que en este caso es 1 kW; lo mismo sucede con la bomba de alta presión donde el fabricante por datos de chapa establece una potencia nominal de 0.375 kW. Entonces al realizar los cálculos se obtiene una eficiencia térmica para el ORC en modo simple de 1.79 %. Este es un

Cuadro 5.7. Medición de variables planta ORC en régimen de trabajo regeneración.

Sensores de temperatura						Sensores de presión			Flujo másico	Calor de entrada
Temp. TT-01 °(C)	Temp. TT-02 °(C)	Temp. TT-03 °(C)	Temp. TT-04 °(C)	Temp. TT-05 °(C)	Temp. TT-06 °(C)	Pit-01 (kPa)	Pit-02 (kPa)	Pit-03 (kPa)	\dot{m} (kg/s)	Q_{in} (kcal/h)
39.5	78.8	70.9	43.1	27.5	40.1	51.5	75.8	68.2	0.035	21553
35.6	78.9	72.1	42.1	27.4	39.8	52.5	76.4	67.9	0.036	22893
37.9	79.5	71.6	42.6	26.9	41.2	54.5	73.9	68.1	0.033	23456
38.5	79.5	71.2	40.9	26.2	40.3	53.9	75.6	69.5	0.039	22217
39.6	78.2	73.4	43.5	27.6	39.8	55.9	74.5	69.8	0.039	24589
37.5	80.2	72.5	43.2	29.3	39.5	52.4	75.1	70.2	0.038	20997
39.4	80.4	72.4	41.9	28.6	39.6	57.4	74.6	66.4	0.041	21146
37.5	77.6	73.1	43.8	27.4	39.9	53.9	74.8	67.5	0.045	23367
38.5	75.3	71.5	41.6	26.9	40	52.9	75.9	68.4	0.041	22208
39.5	75.6	72.3	40.8	27.4	38.9	54.9	75.4	70.4	0.033	21653
39.5	79.2	74.6	42.5	27.9	37.8	56.3	74.2	68.6	0.038	23371
38.6	77.4	73.6	42.6	28.4	40.3	54.3	75.6	67.4	0.037	22478
38.4	77.6	71.8	44.5	28.5	40.5	55.7	76.5	67.5	0.042	20993
37.9	77.9	70.8	42.3	27.6	39.5	54.9	76.4	69.5	0.039	21479
39.6	79.4	72.5	40.9	27.1	39.5	58.7	76.3	67.6	0.044	23601
37.8	76.9	72.6	42.7	27.9	38.7	54.6	74.6	67.5	0.033	22893
39.4	76.5	71.4	44.6	29.5	37.6	52.3	75.9	67.4	0.033	23010
36.4	78.1	74.6	43.6	27.3	39.1	54.8	78.5	68.9	0.032	21431
38.4	75.6	72.5	42.3	27.4	38.9	53.6	75.4	68.2	0.039	22634
39.6	78.9	72.9	43.1	26.7	39.9	55.4	72.6	66.4	0.04	22300
38.6	78.08	72.42	42.63	27.68	39.55	54.52	75.4	68.27	0.038	22413.5

valor extremadamente bajo, el cual indica que de todo el calor de entrada aplicado solo se convierte en trabajo útil el 1.79 %. Para efectos prácticos en la industria los sistemas termodinámicos no manejan eficiencias tan bajas, pero en el caso de esta planta prototipo por ser un modelo a escala donde se prueban configuraciones y tecnologías para ver si se pueden masificar en la industria, pues no es un valor anormal.

Es necesario aclarar que al realizar un análisis de la figura 5.3 se observa que el dispositivo que se utiliza como calor de entrada para el cálculo de la eficiencia energética en el caso de los cuadros 5.5, 5.6 y 5.7 es el generador de vapor. Lo cual es un análisis válido para la investigación, pero existe un enfoque que también es interesante. Este consiste en establecer como generador de vapor al intercambiador de calor donde la caldera envía el aceite térmico. Más adelante se retoma esta idea.

Cuando se analiza estrictamente la ecuación 2.12 para el caso de los datos obtenidos en modo regeneración, se observa que para el análisis se debe tomar en cuenta una serie de dispositivos que no se encuentran en modo simple. Los equipos que aportan y consumen potencia para este análisis son en el caso de los que consumen, además de la bomba de alta presión que se encuentra en el modo simple, se agrega la bomba de regeneración que no es más que la encargada de mantener el

Cuadro 5.8. Continuación cuadro 5.7

Calor de entrada	Entalpía		Trabajo turbina	Trabajo bomba alta presión	Trabajo bomba regeneración	Trabajo sistema solar	Eficiencia
Q_{in} (kW)	h_{in} (kJ/kg)	h_{out} (kJ/kg)	W_{tur} (kW)	W_{bap} (kW)	W_{brgn} (kW)	W_{ss} (kW)	n_{ter} (%)
25.07	468.33	442.73	0.896	0.59	0.52	2.35	8.521
26.62	469.49	441.79	0.997	0.56	0.39	2.41	9.229
27.28	469	442.19	0.885	0.52	0.45	2.52	8.925
25.84	468.6	440.66	1.090	0.49	0.43	2.12	8.861
28.60	470.7	442.97	1.081	0.48	0.48	2.09	7.733
24.42	469.83	442.79	1.028	0.56	0.4	1.8	7.648
24.59	469.8	441.47	1.162	0.59	0.5	2.35	9.847
27.18	470.45	443.3	1.222	0.51	0.56	2.42	9.463
25.83	468.9	441.32	1.131	0.48	0.51	2.34	9.605
25.18	469.63	440.54	0.960	0.49	0.49	2.51	9.888
27.18	471.88	442.05	1.134	0.49	0.56	1.98	7.592
26.14	470.94	442.2	1.063	0.48	0.42	2.37	9.691
24.41	469.21	443.89	1.063	0.52	0.48	2.53	10.622
24.98	468.21	441.91	1.026	0.56	0.47	2.41	9.630
27.45	469.88	440.52	1.292	0.55	0.39	2.31	9.698
26.62	469.98	442.28	0.914	0.52	0.43	2.4	8.879
26.76	468.83	444.08	0.817	0.47	0.44	2.43	8.732
24.92	471.87	443.1	0.921	0.46	0.48	2.36	9.391
26.32	469.87	441.94	1.089	0.49	0.51	2.53	9.950
25.93	470.28	442.62	1.106	0.46	0.53	2.39	9.664
26.07	469.78	442.22	1.044	0.51	0.47	2.33	9.166

flujo de agua caliente desde el sistema de captación solar.

En el caso de los equipos que aportan además del trabajo producido por la turbina, se agrega la potencia calórica que agrega el sistema de captación solar al sistema de regeneración a través del intercambiador de calor de regeneración. Es por ello que al realizar un estudio de la ecuación 2.12 se observa que para el caso de modo de operación de regeneración se agregan más elementos a esta.

Ejecutando un análisis estricto del valor de eficiencia térmica reportado se observa como este mejora mucho en comparación con el ciclo simple. Esto se debe a que el sistema de captación solar provee de una potencia absoluta de una magnitud mayor que la que consume la bomba de regeneración. Esto posibilita que la eficiencia térmica aumente. Sin embargo, en la industria esto puede significar que el sistema de captación es demasiado grande, y al sobredimensionar un sistema se incurre en gastos mayores en cuanto a instalación, mantenimiento y adquisición; todos los cuales son elementos a tener en cuenta a la hora de valorar la viabilidad técnica de un proyecto.

5.6. Análisis de datos obtenidos con sistema de instrumentación

A modo de comprender mejor la relación entre el comportamiento de las variables en los diferentes modo de operación se muestran las siguientes gráficas.

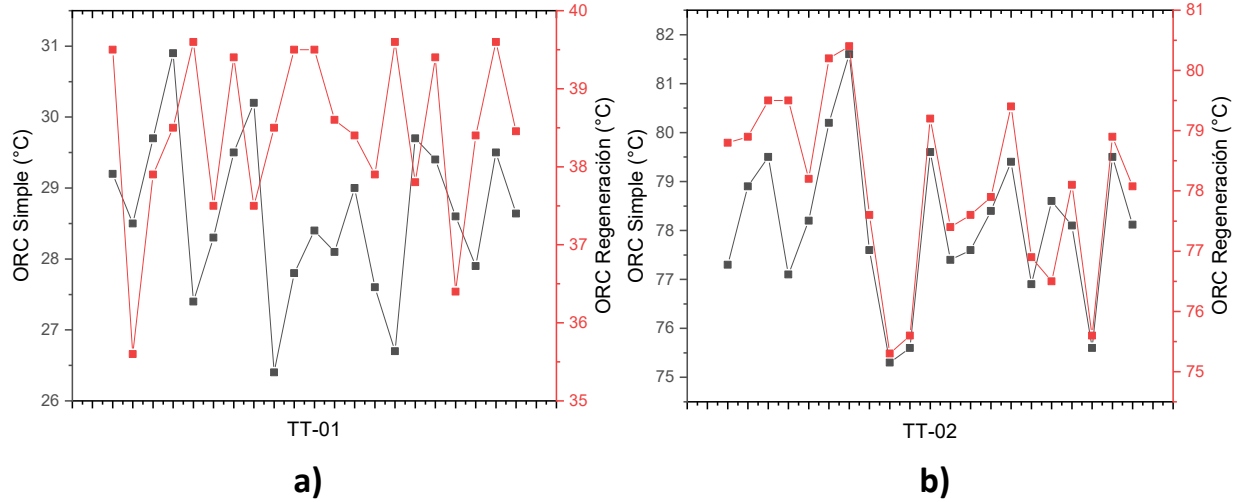


Figura 5.6. Comportamiento de la temperatura en modo simple y regeneración visto desde el TT-01 y TT-02.

La figura 5.6 muestra las mediciones obtenidas tanto para el modo de trabajo simple y regeneración del TT-01 (a) y TT-02 (b). En el caso del TT-01 se nota la diferencia entre los valores obtenidos cuando se compara un régimen de trabajo con otro. La diferencia entre los valores es apreciable, como se denota en el caso del modo simple la temperatura en ese punto es más baja que en el modo regeneración.

La explicación a este fenómeno viene dada porque en el modo simple el fluido de trabajo pasa por la bomba de alta presión donde el refrigerante se comprime pero viene con la temperatura que mantiene luego de condensarse en la torre de enfriamiento. Sin embargo en el caso del modo regeneración existe otro escenario, y es que el fluido de trabajo luego de pasar por la bomba de alta presión entra una parte al intercambiador de regeneración donde adquiere temperatura proveniente de la etapa de captación solar.

En el análisis de la figura 5.6 pero en las mediciones realizadas por el TT-02, se observa que los valores medidos tanto en el modo simple como en el de regeneración se mantienen prácticamente iguales, lo cual se debe a que en ese segmento del ORC no existe ninguna fuente de calor o dispositivo que le otorgue al fluido de trabajo una condición diferente cuando se trabaja en un régimen u otro.

En la figura 5.7 se observan las mediciones obtenidas del TT-03 (a) y TT-04 (b). Cuando se comparan las mediciones obtenidas del TT-03 para ambos regímenes de trabajo no se observan variaciones significativas, lo cual tiene sentido debido a que ese sensor se encuentra a la entrada de la bomba de alta presión, luego de que el refrigerante ha salido de la torre de enfriamiento. Es por ello que en ambos modos de operación al no transcurrir por segmentos de la planta ORC diferentes los valores obtenidos tienden a ser similares. Exactamente el mismo fenómeno sucede con las mediciones obtenidas con el TT-04, debido a que el instrumento de medición se encuentra

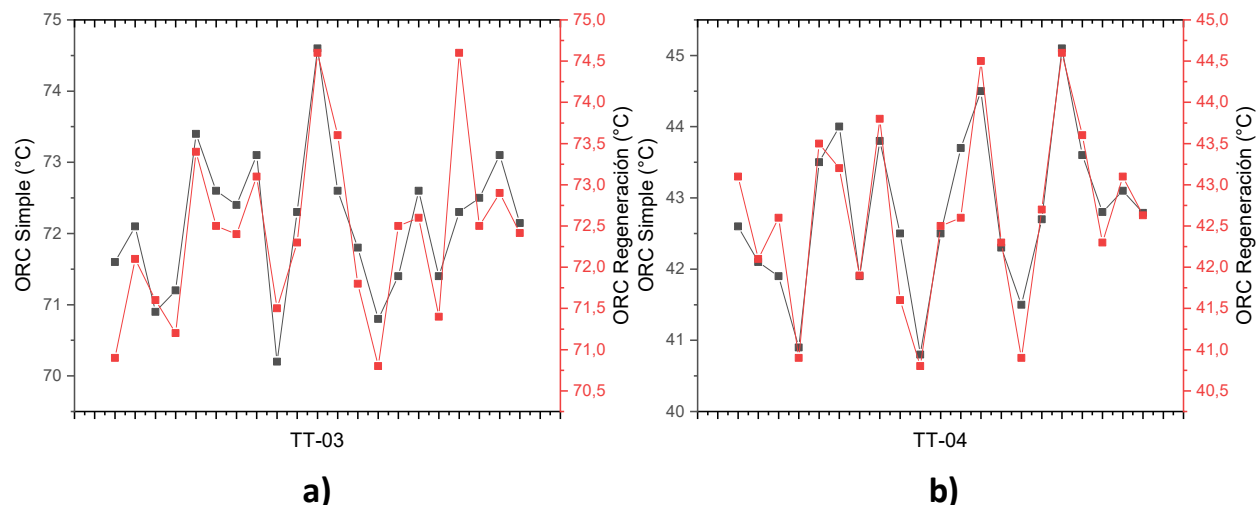


Figura 5.7. Comportamiento de la temperatura en modo simple y regeneración visto desde el TT-03 y TT-04.

a la salida del fluido de trabajo de la turbina, este se dirige a la zona de condensación luego de expandirse y por lo tanto perder presión y temperatura; pero a modo general transcurre en ambos modos de operación por el mismo circuito de tuberías y por lo tanto las mediciones tienden a ser similares.

Para el análisis de la figura 5.8 se tienen las mediciones del TT-05 (a) y de las entalpías de entrada y salida (b). En el caso de la medición de temperatura, esta se suscita a la salida del intercambiador del circuito de condensación. Como se aprecia al analizar el gráfico existe una tendencia entre los valores a no sufrir grandes variaciones, de esta forma se puede percibir que entre los sensores de temperatura, exceptuando el TT-01; a modo general en la planta ORC no existen cambios significativos en las mediciones realizadas en ambos modos de operación.

Esto se basa en que en los puntos donde se realizan las mediciones no hay segmentos del sistema de regeneración y por lo tanto al estar establecida el punto de operación de la caldera para ambas condiciones de operación exactamente igual pues los valores de temperatura y presión tienden a mantenerse en valores similares. También se puede concluir que solo en la etapa de regeneración y en los valores medidos pertenecientes a esta etapa es donde se encuentran cambios entre ambos modos de operación.

En el caso de la figura 5.6 y los valores de entalpía, estos se obtienen luego de ingresar los valores de temperatura y presión en el software REFPROP 9.0 académico. Con estos valores de entalpía se calcula el calor entregado por el intercambiador de calor principal, el trabajo producido en la turbina y la eficiencia térmica. Para el cálculo de la entalpía de forma convencional se necesitan siempre al menos dos variables, o una variable y el estado termodinámico; con esos datos y la tabla otorgada por el fabricante del fluido de trabajo se buscan los valores de entalpía. En el caso de estas investigación, con el uso del software el proceso se realiza de forma ágil.

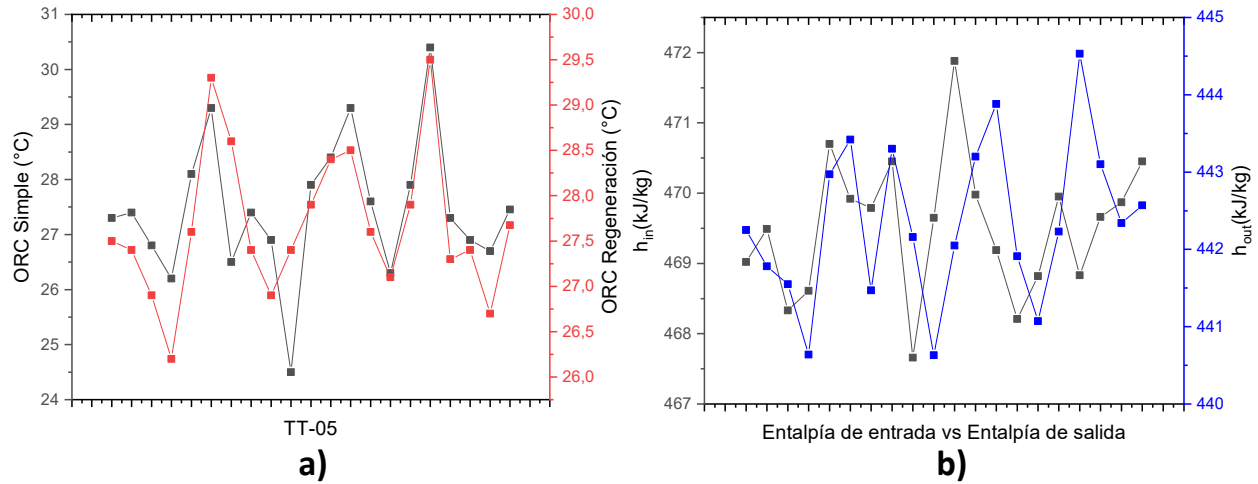


Figura 5.8. Comportamiento de la temperatura en modo simple y regeneración visto desde el TT-05 y Entalpía.

5.7. Validación de resultados

En la sección de metodología se detallaba la estructura de cada ciclo de trabajo y el procedimiento para obtener las mediciones. Para validar los resultados obtenidos existen dos escenarios.

1. Primer escenario

Este escenario compara la eficiencia térmica entre el modo de operación simple y con regeneración. Las mediciones de ambos regímenes de funcionamiento se muestran en el cuadro 5.5 para el modo simple y el cuadro 5.6 y 5.7 para el modo de regeneración. Al comparar los resultados se observa que la planta ORC tiene una mayor eficiencia térmica en modo regeneración (9.1 %) que en modo simple (1.79 %). Estos datos validan la hipótesis de la investigación donde se plantea que una etapa de regeneración en una planta ORC posibilita una mayor eficiencia térmica cuando se compara con un ciclo operando bajo modo simple.

Para realizar un análisis termodinámico a un proceso como el que ocurre en una ORC, en muchos casos se realizan muchas presunciones a fin de aplicar las ecuaciones pertinentes en cada caso. Recaltar que para el primer escenario se toma como fuente de calor de entrada el generador de vapor, que se muestra en la figura 5.10 y se asume que no existen pérdidas en el intercambiador de calor principal. Esto constituye un examen válido, pero aún es posible realizar otro estudio para confirmar la veracidad del primer escenario.

2. Segundo escenario

Debido a que el generador de vapor es la fuente que suministra potencia calórica a la planta ORC, para el análisis del primer escenario fue el elemento analizado. En esta se pretende estudiar el intercambiador de calor que le imprime el calor producido por el generador de vapor al fluido de trabajo. En el proceso que implica la caldera, se calienta un aceite térmico que fluye a través de un circuito del intercambiador de calor, mientras que por el otro circuito el fluido refrigerante circula. Por las leyes de la termodinámica se conoce que la transferencia

de calor se realiza desde el medio más caliente hacia el más frío, hasta que las temperaturas se igualan.

Utilizando este principio en el intercambiador de calor, el aceite térmico caliente proveniente del generador de vapor transfiere calor al fluido refrigerante. Existe similitud entre este escenario y el primero, donde la principal diferencia reside en que en el actual escenario solo se tomaría como fuente de calor de entrada la potencia calórica entregada por el intercambiador; mientras que en el primer caso como ya se ha explicado se asume el calor de entrada como todo el vapor generado en la caldera sin contabilizar el que pasa o entrega el intercambiador.

Para calcular el calor entregado por el intercambiador de calor al fluido de trabajo se utiliza la siguiente ecuación que se deriva del desarrollo de la ecuación 2.2:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}(h_{out} - h_{in}) \quad (5.1)$$

donde se realizan las siguientes suposiciones:

$\dot{Q}_{out} \approx 0$, por ser un proceso adiabático.

$\dot{W}_{in}, \dot{W}_{out} = 0$, porque no se requiere una potencia eléctrica para poner en funcionamiento el dispositivo y este tampoco produce energía eléctrica.

$\Delta KE = \Delta PE = 0$, porque los cambios en la energía cinética y potencial son despreciables.

$\frac{dE_{sys}}{dt} = 0$, porque el sistema se encuentra en estado estable.

Con los escenarios descritos y las ecuaciones 2.12 y 5.1 se toman los datos de las mediciones realizadas en los distintos ciclos de operación en ambos regímenes de trabajo y se calcula la eficiencia térmica.

El cuadro 5.9 muestra los parámetros utilizados para el cálculo de la eficiencia térmica de la planta ORC bajo las condiciones establecidas en el escenario 1. Al comparar los valores calculando la eficiencia térmica utilizando la Q_{in} del generador de vapor o del intercambiador principal se nota una diferencia modular considerable. Para el caso del generador de vapor se obtiene un valor de 1.79 %, mientras que para el caso del análisis desde el intercambiador de calor se obtiene un valor de 35.21 %. Los números obtenidos confirman que al analizar el ciclo desde dispositivos diferentes pues el valor de eficiencia varía. Esto se debe a las pérdidas mecánicas, la disipación de calor, la fricción en las tuberías y defectos de diseño. No obstante ambos resultados son válidos.

Con el análisis del cuadro 5.10 se obtienen los resultados de la eficiencia térmica bajo la perspectiva del escenario 2. Cuando se comparan los valores obtenidos en el cuadro 5.6 y 5.7 pertenecientes al modo regeneración bajo la óptica del generador de vapor con los obtenidos en el escenario 2; se nota variaciones considerables en los resultados.

La eficiencia térmica de la planta ORC en modo regeneración con una Q_{in} proveniente del generador de vapor es de 9.18 %. En el caso del escenario 2 este valor se eleva hasta el 65.7 %. Como se denota, existe un cambio radical, lo que en el caso del modo de operación regeneración se debe a dos motivos fundamentales.

En primer lugar sucede que al igual que en el escenario 1 al analizar la eficiencia térmica desde el intercambiador de calor principal la eficiencia aumenta porque se disminuyen las pérdidas antes descritas. Y en segundo lugar se debe a la etapa de captación solar acoplada que brinda un aporte de potencia significativo al ciclo. Esto trae consigo un aumento de la eficiencia térmica cuando se analiza el valor desde el punto de vista modular, pero se debe analizar si es viable operacionalmente

Cuadro 5.9. Eficiencia térmica planta ORC en modo simple bajo condiciones de escenario 2.

Temp. TT-01 °(C)	Temp. TT-02 °(C)	Pit-01 (kPa)	Pit-02 (kPa)	h_{in} (kJ/kg)	h_{out} (kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	Q_{in} (kW)	W_{tur} (kW)	W_{bap} (kW)	n_{ter} (%)
29.2	77.3	52.3	75.6	429.57	474.36	0.034	1.52	1.000	0.375	41.04
28.5	78.9	52.9	76.4	429.51	475.9	0.036	1.67	1.000	0.375	37.42
29.7	79.5	54.5	73.9	430.53	476.52	0.033	1.52	1.000	0.375	41.18
30.9	77.1	54.6	74.6	431.6	474.18	0.041	1.75	1.000	0.375	35.80
27.4	78.2	55.9	74.5	428.43	475.25	0.039	1.83	1.000	0.375	34.23
28.3	80.2	56.2	75.1	429.22	477.18	0.038	1.82	1.000	0.375	34.29
29.5	81.6	57.4	73.9	430.26	478.56	0.043	2.08	1.000	0.375	30.09
30.2	77.6	53.9	74.8	431	474.66	0.045	1.96	1.000	0.375	31.81
26.4	75.3	52.4	75.9	427.66	472.42	0.041	1.84	1.000	0.375	34.06
27.8	75.6	51.5	76.1	428.93	472.71	0.039	1.71	1.000	0.375	36.60
28.4	79.6	56.3	74.2	429.31	476.61	0.038	1.80	1.000	0.375	34.77
28.1	77.4	54.3	75.6	429.11	474.45	0.037	1.68	1.000	0.375	37.26
29	77.6	56.3	75.3	429.84	474.65	0.046	2.06	1.000	0.375	30.32
27.6	78.4	54.9	76.4	428.64	475.41	0.045	2.10	1.000	0.375	29.70
26.7	79.4	58.7	76.3	427.7	476.38	0.044	2.14	1.000	0.375	29.18
29.7	76.9	56.3	74.8	430.47	473.99	0.033	1.44	1.000	0.375	43.52
29.4	78.6	52.3	75.9	430.34	475.61	0.035	1.58	1.000	0.375	39.45
28.6	78.1	54.8	76.2	429.54	475.12	0.038	1.73	1.000	0.375	36.08
27.9	75.6	55.6	75.4	428.88	472.72	0.042	1.84	1.000	0.375	33.94
29.5	79.5	57.4	74.7	430.26	476.51	0.04	1.85	1.000	0.375	33.78
28.64	78.12	54.925	75.28	429.57	475.16	0.03935	1.79	1.000	0.375	34.84

y económicamente instalar sistemas así con el único objetivo de aumentar la eficiencia térmica en una planta ORC.

Como se observa la eficiencia térmica de la planta ORC aumenta bajo el modo de regeneración. Establecer dos condiciones para comprobar la hipótesis establece un precedente positivo para validar los resultados obtenidos. No obstante, es necesario recalcar que ambas formas son válidas; y en caso de no contar con los medios para realizar ambos análisis con uno que se aplique es suficiente. Para el caso de la planta ORC operando bajo modo simple la eficiencia térmica es baja cuando se analiza desde la perspectiva del generador de vapor. Cuando se utilizan las ecuaciones para cuantificar el rendimiento desde el intercambiador de calor, se obtienen valores de eficiencia térmica más acordes con los reportados en otras investigaciones similares.

Lo mismo sucede con el caso del análisis del rendimiento térmico. Cuando el valor se examina desde el Q_{in} provisto por el generador de vapor, el valor es más bajo que los reportados en algunos artículos consultados. No obstante, la óptica cambia cuando se realiza el análisis desde las condiciones del escenario 2. A modo de comparar los resultados obtenidos, el cuadro 5.11 muestra los valores de eficiencia térmica obtenidos en otras investigaciones. Como se aprecia existen valores de eficiencia térmica similares a los obtenidos en la presente investigación. Recalcar que estos valores pertenecen a estudios donde se trabaja con ciclos combinados, recalentamiento y regeneración; es por ello que no existen valores de eficiencia tan bajos como los obtenidos en este estudio. Esto se

Cuadro 5.10. Eficiencia térmica planta ORC en modo regeneración bajo condiciones de escenario 2.

Temp. TT-06 °(C)	Temp. TT-02 °(C)	Pit-01 (kPa)	Pit-02 (kPa)	h_{in} (kJ/kg)	h_{out} (kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	Q (kW)	W_{tur} (kW)	W_{bap} (kW)	W_{brgn} (kW)	W_{ss} (kW)	n_{ter} (%)
40.1	78.8	51.5	75.8	440	475.81	0.035	1.25	0.896	0.59	0.52	1.03	65.11
39.8	78.9	52.5	76.4	439.7	475.9	0.036	1.30	0.997	0.56	0.39	0.85	68.85
41.2	79.5	54.5	73.9	440.91	476.52	0.033	1.18	0.885	0.52	0.45	0.79	59.97
40.3	79.5	53.9	75.6	440.11	476.49	0.039	1.42	1.090	0.49	0.43	0.95	78.91
39.8	78.2	55.9	74.5	439.6	475.25	0.039	1.39	1.081	0.48	0.48	0.56	49.01
39.5	80.2	52.4	75.1	439.43	477.18	0.038	1.43	1.028	0.56	0.4	0.64	49.32
39.6	80.4	57.4	74.6	439.38	477.38	0.041	1.56	1.162	0.59	0.5	0.74	52.09
39.9	77.6	53.9	74.8	439.75	474.66	0.045	1.57	1.222	0.51	0.56	0.83	62.49
40	75.3	52.9	75.9	439.87	472.42	0.041	1.33	1.131	0.48	0.51	0.93	80.24
38.9	75.6	54.9	75.4	438.81	472.72	0.033	1.12	0.960	0.49	0.49	0.74	64.34
37.8	79.2	56.3	74.2	437.77	476.22	0.038	1.46	1.134	0.49	0.56	0.79	59.79
40.3	77.4	54.3	75.6	440.1	474.45	0.037	1.27	1.063	0.48	0.42	1.01	92.32
40.5	77.6	55.7	76.5	440.24	474.63	0.042	1.44	1.063	0.52	0.48	0.98	72.24
39.5	77.9	54.9	76.4	439.36	474.93	0.039	1.39	1.026	0.56	0.47	0.96	68.89
39.5	79.4	58.7	76.3	439.25	476.38	0.044	1.63	1.292	0.55	0.39	0.67	62.55
38.7	76.9	54.6	74.6	438.64	473.99	0.033	1.17	0.914	0.52	0.43	0.85	69.79
37.6	76.5	52.3	75.9	437.71	473.58	0.033	1.18	0.817	0.47	0.44	0.87	65.62
39.1	78.1	54.8	78.5	439	475.08	0.032	1.15	0.921	0.46	0.48	0.91	77.14
38.9	75.6	53.6	75.4	438.85	472.72	0.039	1.32	1.089	0.49	0.51	0.61	52.94
39.9	78.9	55.4	72.6	439.71	475.96	0.04	1.45	1.106	0.46	0.53	0.94	72.86
39.55	78.08	54.52	75.4	439.41	475.11	0.0379	1.35	1.044	0.51	0.47	0.69	55.38

debe a que a modo industrial es poco usual encontrar un ORC donde se trabaje permanentemente en modo simple.

Los estudios confrontados validan los resultados obtenidos en el presente estudio, debido a que en el caso de la planta ORC con la etapa de regeneración se obtiene una eficiencia térmica de un 65.7%, el cual es un valor inferior a los obtenidos en otras investigaciones. A modo general, el rendimiento puede variar mucho dependiendo de la estructura del ciclo, fluido de trabajo, potencia instalada, condiciones geográficas y aplicación.

En el caso de este estudio queda demostrado con el análisis de los resultados, que es verídico que una planta ORC con una etapa de regeneración alimentada con un sistema de captación solar presenta un mayor rendimiento térmico que la planta ORC operando bajo régimen simple.

Cuadro 5.11. Eficiencia térmica obtenidas en otros estudios.

Referencia	Fecha de estudio	Eficiencia térmica	Caso de estudio
[78]	2022	37.12	Aplicación del simulador Aspen HYSYS en la resolución de problemas del ciclo Rankine regenerativo con recalentamiento intermedio
[79]	2020	14 - 17	Optimización de la eficiencia de una planta de potencia solar con ciclo rankine orgánico
[80]	2021	76.8	Thermal efficiency and boundary analysis of compression ignition internal combustion Rankine cycle engine
[81]	2023	13.9	Analytical model for thermal efficiency of organic Rankine cycles, considering superheating, heat recovery, pump and expander efficiencies
[82]	2021	10.54	Enhanced thermal efficiency organic Rankine cycle for renewable power generation
[83]	2022	49.4	Combined Rankine Cycle and dew point cooler for energy efficient power generation of the power plants - A review and perspective study
[84]	2020	25.22	Power and efficiency optimizations of an irreversible regenerative organic Rankine cycle
[85]	2021	28.48	Design and thermodynamic analysis of a combined system including steam Rankine cycle, organic Rankine cycle, and power turbine for marine low-speed diesel engine waste heat recovery
Esta investigación	2024	65.7	Comparación de la eficiencia térmica entre modo de operación simple y modo de regeneración con sistema de captación solar en planta ORC prototipo

Conclusiones

En la presente investigación se ha realizado un estudio donde se ha implementado una etapa de captación solar en una planta ORC, esto permite operar el ciclo en múltiples regímenes de operación. En este caso en particular en modo simple y regeneración. Un ORC cuenta con una turbina de vapor que brinda la posibilidad de operar con fluidos orgánicos que a su vez permiten la utilización de fuentes de calor de baja y media temperatura. La implementación del uso de fluidos orgánicos permite aprovechar el calor residual provenientes de procesos fabriles, esto contribuye al cuidado del medio ambiente.

El concepto aplicado en una planta ORC posibilita la reducción de las emisiones de CO_2 , esto gracias a que un sistema de captación solar es un dispositivo alimentando con energía renovable; y al este suministrar energía a la etapa de regeneración limita el consumo de energías fósiles para generar vapor. A modo general se comprueba que el acoplamiento de un sistema de regeneración mejora la eficiencia térmica del ORC en alrededor de un 30 %. La mejora obtenida es capaz de justificar por sí sola la instalación y puesta en marcha de la etapa de regeneración acoplada a un sistema de captación solar.

Como se ha demostrado los cambios acaecidos en la planta ORC han establecido la mejora de la eficiencia térmica, pero cabe el cuestionamiento de cuan positivo puede ser implementar sucesivas etapas de regeneración en aras de mejorar el rendimiento. Es posible que sí, pero se tendría que comenzar a analizar el beneficio tentativo contra el costo de desarrollar un sistema de tal magnitud.

El análisis de las ecuaciones que rigen el balance de masa y energía han aportado las herramientas matemáticas necesarias para establecer las mejoras en la eficiencia térmica. Otro aspecto a mencionar es que aunque los ciclos termodinámicos no son capaces de alcanzar los rendimientos de los ciclos a gas, son capaces de dejar de emitir 1226.4 toneladas de CO_2 a la atmósfera [86].

Según la metodología establecida para el desarrollo de la investigación, las conclusiones se pueden resumir a continuación:

- El análisis de las ecuaciones de balance de masa y energía constituyen una herramienta esencial para realizar análisis óptimos a un ciclo termodinámico.
- Implementar una etapa de regeneración con un suministro de energía proveniente de un sistema de captación solar en una planta ORC permite el aumento de la eficiencia térmica del ciclo.

- Para la mejora de la eficiencia térmica es fundamental la implementación de la etapa de regeneración.
- La temperatura de entrada del fluido de trabajo orgánico al intercambiador principal proveniente de la etapa de regeneración constituye un factor crítico.
- Los resultados reportados en esta investigación son útiles para realizar un análisis económico en función del diseño y selección de los elementos y dispositivos a utilizar en la planta ORC a la hora de implementar una etapa de captación solar.

6.0.1. Trabajos a futuro

Considerando el aprovechamiento del recurso solar tema objeto de estudio de la presente investigación, se recomienda realizar un análisis del impacto en el rendimiento térmico de la planta ORC del uso de otros fluidos refrigerantes; como por ejemplo el R134a. Otra área de estudio la constituye el uso de un colector solar que cuente con un sistema de seguimiento solar, lo cual puede optimizar la captación de la radiación solar permitiendo de esta forma maximizar la potencia calórica entregada al agua que circula por la etapa de regeneración.

Anexos



Figura 7.1. Primer artículo publicado.



RESEARCH ARTICLE

An Approach for Energy and Cost Savings for a Seafood Processing Plant

RAÚL ALEJANDRO MARTÍNEZ-SÁNCHEZ¹,
JUVENAL RODRÍGUEZ-RESÉNDIZ¹, (Senior Member, IEEE),
JOSÉ M. ÁLVAREZ-ALVARADO¹, AND JOSÉ R. GARCÍA-MARTÍNEZ²

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro 76010, Mexico

²Facultad de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Universidad Veracruzana, Poza Rica 93390, Mexico

Corresponding author: Juvenal Rodríguez-Reséndiz (juvenal@uaq.edu.mx)

ABSTRACT Food and Agriculture Organization (FAO) estimates an average of 140, 300, and 589 kWh of electrical energy consumed to process fishmeal, fish, and shrimp, respectively, without adding the costs associated with freezing the finished product. Current research focuses on implementing an Energy Management System (EnMS) in a seafood processing plant that supports energy savings at low cost. This article presents, as a contribution from the qualitative point of view, the non-need for external financing to implement the EnMS under the ISO 50001 standard and the identification of the Energy Performance Indicators (EnPIs) of the case study plant. The energy awareness of the workers is evident when analyzing the results of the surveys carried out before and after the implementation of the EnMS. As part of the research, an Automated Reporting System (ARS) is developed; the performance enables energy information to be concentrated in a single file under a standard format approved by the energy commission and sent systematically. From a quantitative point of view, there is a 13.2% reduction in the total electricity consumption of the plant and a decrease in the cost of electricity needed per ton produced, from 9.40 USD to 7.30 USD. The emission of greenhouse gases into the atmosphere due to electricity consumption decreases by 13.78%.

INDEX TERMS ISO 50001, energy management system, energy cost saving, performance evaluation, monitoring, profitability.

I. INTRODUCTION

Ecuador is the second most potent tuna fleet in the Eastern Pacific. In 2018, 593,000 tons of tuna caught in the Eastern Pacific Ocean, around 61% arrived at Ecuadorian ports. On the other hand, the Ecuadorian shrimp industry generates 3,100 million USD a year in more than 200,000 hectares of cultivation and represents around 15% of the total exports of the country [1]. Ecuadorian seafood processing plants produce more than 500,000 tons of tuna, other varieties of fish, and shellfish per year, of which 80% is sent to the foreign market, and only 20% is for local consumption. Exports of tuna and shrimp represent more than 7% of the GDP [2].

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Khurshed Aurangzeb.

The consulted bibliography shows few studies on energy consumption in fish and shellfish processing plants. [3] states that the food processing industry in the USA consumes 75 TWh of electrical energy, equivalent to 8% of the electricity consumed by all manufacturing sectors. In contrast, [4] in his study states that the average specific energy consumption for processing fish and shellfish is about 0.11 kWh/kg of electricity and 520 kg of fuel oil per ton. Due to the limited amount of information available, the accuracy of the data may differ.

The International Organization for Standardization created the ISO 50001 standard as a reference for implementing the Energy Management System (EnMS) in 2011. In 2018 it was updated and was in use to date [5]. ISO 50001 has as its primary function the development of structures, practices, policies, and systems that improve the energy performance

Figura 7.2. Segundo artículo publicado.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE LENGUAS Y LETRAS



A QUIEN CORRESPONDA:

La que suscribe, Directora de la Facultad de Lenguas y Letras, hace **C O N S T A R** que

MARTINEZ SANCHEZ RAUL ALEJANDRO

Presentó el **Examen de Manejo de la Lengua** efectuado el día veintitrés de marzo de dos mil veintitrés, en el cual obtuvo la siguiente calificación:

8

Se extiende la presente a petición de la parte interesada, para los fines escolares y legales que le convengan, en el Campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro, el día treinta de marzo de dos mil veintitrés.



Atentamente,
"Enlazar Culturas por la Palabra"

DRA. ADELINA VELÁZQUEZ HERRERA

AVH/daa*CL*FLL-C.-821

SOMOS UAQ
SERVIR CONSTITUIR TRANSFORMAR

Campus Aeropuerto, Anillo Vial Fray Junípero Serra S/N, Querétaro, Qro, C.P. 76140
Tel. 442 192 12 00 Dirección Ext. 61010, Secretaría Administrativa Ext.61300, Posgrado Ext. 61140,
Licenciatura Ext.61070, Centro de Lenguas Ext.61050, Secretaría Académica Ext.61100 y Planeación Ext.61110

Figura 7.3. Constancia de idioma.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

VOTOS APROBATORIOS DE PROTOCOLO DE TESIS

PROGRAMA DE ESTUDIOS: Maestría en Ciencias (Instrumentación y Control)
NOMBRE: ARANA RUIZ DIEGO
NOMBRE DE LA TESIS: Integración de IoT a un concentrador de disco para mejorar la eficiencia de un horno solar

Elemento del protocolo	Requerimiento
Redacción y Estilo	El documento es legible, coherente y está libre de errores gramaticales. El estilo es directo, impersonal y se enfoca en las evidencias, análisis, hallazgos y resultados.
Formato	El documento se apeg a la estructura y lineamientos del formato aprobado por la DIPFI.
- Título del proyecto de tesis	El título describe la esencia del trabajo en 20 palabras o menos.
- Línea de investigación	El trabajo se inserta en una de las Líneas de Generación y Aplicación del Conocimiento del programa de estudios correspondiente.
II Antecedentes	Los antecedentes describen la evaluación del conocimiento acerca del fenómeno o hecho a investigar. Se identifican el estado del arte y de la técnica relacionados con el problema bajo estudio.
III Justificación	Se aporta evidencia que demuestra la pertinencia del trabajo en el contexto de la(s) disciplina(s) del programa y la viabilidad económica y técnica del proyecto.
IV Descripción del problema	Se identifican los fenómenos, hechos o situaciones, que puestos en relación presentan incongruencia, obstáculos, desconocimiento o discrepancia y que constituyen el objeto de estudio.
V Fundamentación teórica	La Fundamentación Teórica plantea la perspectiva desde donde se desarrollará el estudio (modelo teórico, básico), los elementos del tema que consideramos más significativos (variable con las cuales va a interactuar el investigador), y los instrumentos teóricos de análisis de los datos obtenidos.
VI Hipótesis y objetivos	La hipótesis es un enunciado a renglón corrido, que plantea una posible respuesta a la pregunta de investigación basada en la teoría y en la práctica, estableciendo relaciones entre las variables del problema y que al contrastarse proporcionará conocimiento nuevo en la disciplina de estudio.
(de acuerdo al tipo de programa)	Los objetivos son alcanzables, específicos, medibles, realistas y tienen un plazo. Existe congruencia entre el título de la tesis, la hipótesis y los objetivos.
VII Metodología y cronograma	La metodología describe los materiales, herramientas y métodos que se usarán para verificar la hipótesis y lograr los objetivos del trabajo de investigación, a un nivel de detalle suficiente para permitir la réplica del trabajo. El cronograma está desarrollado en un diagrama de Gantt y el proyecto se puede concluir dentro de los tiempos establecidos en el programa de posgrado correspondiente.
VIII Resultados esperados, posibles aplicaciones y uso del proyecto	Se especifican los productos del trabajo, su impacto científico, tecnológico y económico.
IX Referencias bibliográficas	Las referencias son recientes, pertinentes, están citadas en el texto y se apegan al formato que sugiere la Dirección de Investigación y Posgrado de la UAQ, o el Journal of Animal Science Style and Form (Revised 2005).
Elementos Éticos del Protocolo	Requerimiento para ser Evaluado por el Comité de Ética para la Investigación
1.Aspectos generales	¿Incluye el protocolo las aclaraciones respecto Anexo II del comité de ética: Formato de Registro ante el Comité de Ética para la Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro?
2.Seguridad	¿Se incluye en el protocolo una sección sobre seguridad y buenas prácticas de laboratorio que garanticen la integridad de los investigadores y participantes involucrados?

Nombre: MARTINEZ SANCHEZ RAUL
Puesto de sinodal: VOCAL
Fecha: 22/11/2022 21:39



Nota: La obtención del voto aprobatorio se realiza por medio de la plataforma SAIP

Figura 7.4. Tutoría tesis de Maestría.



Evaluaciones en plataforma (SAIP)

Tema de protocolo:
Metodología para la integración de sistemas fotovoltaicos en edificaciones utilizando técnicas de inteligencia artificial.

Alumno:
ITURRALDE CARRERA LUIS ANGEL

Programa:
MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA ENERGIA

Sinodales

Presidente: RODRIGUEZ RESENDIZ JUVENAL		
Fecha de evaluación	Evaluación	Observaciones
15/11/2022 21:27	Aprobado	Cumple con los requisitos para ser aceptado por los diferentes consejos dentro de la universidad
15/11/2022 21:27	Consideraciones Éticas: Aprobado	Cumple con los requisitos para ser aceptado por los diferentes consejos dentro de la universidad

Secretario: MARTINEZ SANCHEZ RAUL		
Fecha de evaluación	Evaluación	Observaciones
16/11/2022 10:41	No Evaluado	Doy mi voto aprobatorio para que el alumno pueda seguir con su investigación.
16/11/2022 10:57	Aprobado	Doy mi voto aprobatorio para que el alumno pueda seguir con su investigación.
16/11/2022 11:14	No Evaluado	
16/11/2022 15:07	No Evaluado	Doy mi voto aprobatorio
16/11/2022 15:08	Consideraciones Éticas: Aprobado	Doy mi voto aprobatorio para que el alumno pueda registrar exitosamente su protocolo

Vocal: ALVAREZ ALVARADO JOSE MANUEL		
Fecha de evaluación	Evaluación	Observaciones
16/11/2022 10:41	No Evaluado	Doy mi voto aprobatorio para que el alumno pueda seguir con su investigación.
16/11/2022 10:57	Aprobado	Doy mi voto aprobatorio para que el alumno pueda seguir con su investigación.
16/11/2022 11:14	No Evaluado	
16/11/2022 15:07	No Evaluado	Doy mi voto aprobatorio
16/11/2022 15:08	Consideraciones Éticas: Aprobado	Doy mi voto aprobatorio para que el alumno pueda registrar exitosamente su protocolo

Figura 7.5. Tutoría tesis de Maestría.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA



Se otorga la presente

CONSTANCIA a:

RAÚL ALEJANDRO MARTÍNEZ SÁNCHEZ

Por su participación en el
XVII Coloquio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad Autónoma de Querétaro como:

REVISOR DE PÓSTER

*Noviembre de 2023
Facultad de ingeniería*

Dr. Manuel Toledano Ayala
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERÍA

Dr. Juan Carlos Jauregui Correa
Jefe de la División de Investigación y Posgrado
FACULTAD DE INGENIERÍA

Figura 7.6. Participación en Coloquio XVII.

Bibliografía

- [1] Nick Connor. ¿qué es el ciclo de rankine? ciclo de la turbina de vapor: definición. 2020.
- [2] Yunus A Cengel and Afshin J Ghajar. *Transferencia de calor y masa*, volume 53. McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [3] Sipeng Zhu, Kun Zhang, and Kangyao Deng. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120:109611, 2020.
- [4] Byung-Sik Park, Muhammad Usman, Muhammad Imran, and Apostolos Pesyridis. Review of organic rankine cycle experimental data trends. *Energy conversion and management*, 173:679–691, 2018.
- [5] Carlos Núñez Fernández et al. Diseño preliminar de un ciclo orgánico de rankine solar para el suministro eléctrico a una pyme. 2017.
- [6] REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Diccionario de la lengua española, 23.^a ed. <https://dle.rae.es/energ%C3%ADa#FiynjK3>, 2021.
- [7] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Beneficios por el uso de la energía solar. <http://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/beneficios-por-el-uso-de-la-energia-solar?state=published>, 2014.
- [8] Francesco Campana, Michele Bianchi, Lisa Branchini, Andrea De Pascale, Antonio Peretto, Marco Baresi, Alessandro Fermi, Nicola Rossetti, and Riccardo Vescovo. Orc waste heat recovery in european energy intensive industries: Energy and ghg savings. *Energy Conversion and Management*, 76:244–252, 2013.
- [9] Bertrand F Tchanche, Gr Lambrinos, Antonios Frangoudakis, and George Papadakis. Low-grade heat conversion into power using organic rankine cycles—a review of various applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8):3963–3979, 2011.
- [10] Marco ROJAS, Ludym JAIMES, and Maria Valencia. Efectividad, eficacia y eficiencia en equipos de trabajo. *Revista espacios*, 39(06), 2018.
- [11] Yunus A Cengel, Michael A Boles, Victor Campos Olguin, María Teresa Colli Serrano, et al. *Termodinámica*. 2003.

- [12] Fatih Yilmaz. Thermodynamic performance evaluation of a novel solar energy based multigeneration system. *Applied Thermal Engineering*, 143:429–437, 2018.
- [13] R. Loni, O. Mahian, C.N. Markides, E. Bellos, W.G. le Roux, A. Kasaeian, G. Najafi, and F. Rajaei. A review of solar-driven organic rankine cycles: Recent challenges and future outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 2021.
- [14] Evangelos Bellos and Christos Tzivanidis. Investigation of a hybrid orc driven by waste heat and solar energy. *Energy Conversion and Management*, 156:427–439, 2018.
- [15] Haoshui Yu, Henrik Helland, Xingji Yu, Truls Gundersen, and Gürkan Sin. Optimal design and operation of an organic rankine cycle (orc) system driven by solar energy with sensible thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 244:114494, 2021.
- [16] A Nordelo. Fundamentos de gestión energética y tecnología de gestión total y eficiente de la energía. *Edición Cienfuegos: Universidad de Cienfuegos*, 2006.
- [17] IEA. *World Energy Outlook 2023*. 2023.
- [18] Jhonatan Gómez Ramírez. La energía solar fotovoltaica en colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas. 2017.
- [19] Antonio M Pantaleo, Sergio M Camporeale, Arianna Sorrentino, Adio Miliozzi, Nilay Shah, and Christos N Markides. Hybrid solar-biomass combined brayton/organic rankine-cycle plants integrated with thermal storage: Techno-economic feasibility in selected mediterranean areas. *Renewable Energy*, 147:2913–2931, 2020.
- [20] José Manuel Álvarez-Alvarado, GJ Ríos-Moreno, E Ventura-Ramos, Guillermo Ronquillo-Lomeli, and M Trejo-Perea. Experimental study of a 1-kw organic rankine cycle using r245fa working fluid and a scroll expander: A case study. *IEEE Access*, 7:154515–154523, 2019.
- [21] TMI Mahlia, H Syaheed, AE Pg Abas, F Kusumo, AH Shamsuddin, Hwai Chyuan Ong, and MR Bilad. Organic rankine cycle (orc) system applications for solar energy: Recent technological advances. *Energies*, 12(15):2930, 2019.
- [22] Jahar Sarkar and Souvik Bhattacharyya. Potential of organic rankine cycle technology in india: working fluid selection and feasibility study. *Energy*, 90:1618–1625, 2015.
- [23] Costante Mario Invernizzi and Davide Bonalumi. Thermal stability of organic fluids for organic rankine cycle systems. In *Organic Rankine cycle (ORC) power systems*, pages 121–151. Elsevier, 2017.
- [24] Seok Hun Kang. Design and experimental study of orc (organic rankine cycle) and radial turbine using r245fa working fluid. *Energy*, 41(1):514–524, 2012.
- [25] Zehua Xu, Zhiqi Wang, Xiaoxia Xia, Xin Li, Yin Chen, and Qianghui Yi. Molecular dynamics simulation of homogeneous condensation and thermophysical properties of r245fa/r141b. *Applied Thermal Engineering*, 236:121627, 2024.
- [26] Thermal Engineering contributors. What is nusselt number – definition’, thermal engineering. <https://thermal-engineering.org/what-is-nusselt-number-definition>, 2018.

- [27] Sebastian Eyerer, Fabian Dawo, Johannes Kaindl, Christoph Wieland, and Hartmut Spliethoff. Experimental investigation of modern orc working fluids r1224yd (z) and r1233zd (e) as replacements for r245fa. *Applied energy*, 240:946–963, 2019.
- [28] Dolf Gielen, Francisco Boshell, Deger Saygin, Morgan D Bazilian, Nicholas Wagner, and Ricardo Gorini. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24:38–50, 2019.
- [29] Yunus A Çengel and Michael Boles. *Termodinámica* (cuarta edición), 2003.
- [30] Michael J Moran and Howard N Shapiro. *Fundamentos de termodinámica técnica*. Reverté, 2018.
- [31] MANUEL CELSO JUÁREZ CASTELLÓ and M^a PILAR MORALES ORTIZ. *Termodinámica Técnica. Teoría y 222 ejercicios resueltos*. Ediciones Paraninfo, SA, 2015.
- [32] Javier Quintanilla Ramírez. Estudio de centrales basadas en ciclos rankine orgánicos. B.S. thesis, 2020.
- [33] Alberto Cerrada Galán. Análisis de ciclos de rankine orgánicos. 2020.
- [34] Rolando Sixto Basurco Carpio. Balance de materia y energía. *Arequipa: UNSA*, 2021.
- [35] William H Severns, Howard Edward Degler, and HE Miles. *La producción de energía mediante vapor, aire o gas*. Reverté, 2021.
- [36] Benoît Godin. *Models of innovation: The history of an idea*. MIT press, 2017.
- [37] Richard M Felder, Ronald W Rousseau, and María Eugenia Costas Basín. *Principios elementales de los procesos químicos*. Number 660 F4Y 1991. Addison-Wesley Iberoamericana, 1991.
- [38] Mohammad Aliahmadi, Ali Moosavi, and Hani Sadrhosseini. Multi-objective optimization of regenerative orc system integrated with thermoelectric generators for low-temperature waste heat recovery. *Energy Reports*, 7:300–313, 2021.
- [39] Evangelos Bellos and Christos Tzivanidis. Parametric analysis and optimization of an organic rankine cycle with nanofluid based solar parabolic trough collectors. *Renewable Energy*, 114:1376–1393, 2017.
- [40] Yong-qiang Feng, Xin Wang, Hassan Niaz, Tzu-Chen Hung, Zhi-xia He, Alvi Jahan Zeb, and Huan Xi. Experimental comparison of the performance of basic and regenerative organic rankine cycles. *Energy Conversion and Management*, 223:113459, 2020.
- [41] Vedran Medica-Viola, Vedran Mrzljak, Nikola Anđelić, and Maro Jelić. Analysis of low-power steam turbine with one extraction for marine applications. *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo*, 67(2):87–95, 2020.
- [42] J Singh. Heat transfer fluids and systems for process and energy applications.

- [43] Yuanzhi Gao, Guohao Hu, Yuzhuo Zhang, and Xiaosong Zhang. An experimental study of a hybrid photovoltaic thermal system based on ethanol phase change self-circulation technology: Energy and exergy analysis. *Energy*, 238:121663, 2022.
- [44] Johannes Fink. *Petroleum engineer's guide to oil field chemicals and fluids*. Gulf Professional Publishing, 2021.
- [45] Mojtaba Mirzaei, Mohammad Hossein Ahmadi, Mohammad Mobin, Mohammad Alhuyi Nazari, and Reza Alayi. Energy, exergy and economics analysis of an orc working with several fluids and utilizes smelting furnace gases as heat source. *Thermal Science and Engineering Progress*, 5:230–237, 2018.
- [46] Xianglong Luo, Yupeng Wang, Junwei Liang, Ji Qi, Wen Su, Zhi Yang, Jianyong Chen, Chao Wang, and Ying Chen. Improved correlations for working fluid properties prediction and their application in performance evaluation of sub-critical organic rankine cycle. *Energy*, 174:122–137, 2019.
- [47] Xiaoye Dai, Lin Shi, Qingsong An, and Weizhong Qian. Thermal stability of some hydrofluorocarbons as supercritical orcs working fluids. *Applied Thermal Engineering*, 128:1095–1101, 2018.
- [48] Philipp Petr and Gabriele Raabe. Evaluation of r-1234ze (z) as drop-in replacement for r-245fa in organic rankine cycles—from thermophysical properties to cycle performance. *Energy*, 93:266–274, 2015.
- [49] Jian Song and Chun-wei Gu. Parametric analysis of a dual loop organic rankine cycle (orc) system for engine waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 105:995–1005, 2015.
- [50] You-Rong Li, Mei-Tang Du, Chun-Mei Wu, Shuang-Ying Wu, and Chao Liu. Potential of organic rankine cycle using zeotropic mixtures as working fluids for waste heat recovery. *Energy*, 77:509–519, 2014.
- [51] Monje B. Oliva A. Herrando, M. Performance analysis of organic rankine cycles using different working fluids. *Energies*, 11:799, 2018.
- [52] Segovia J. Sánchez-Silva L. Selection of working fluids for organic rankine cycles: A review of applications. *Energies*, 12:3085, 2019.
- [53] Torres A. Oliveira J., Silva F. Environmental impact assessment of organic rankine cycle working fluids. *Journal of Cleaner Production*, 279:123784, 2021.
- [54] Cabeza L. García-Hernando N., Martín M. Stability of working fluids in organic rankine cycle systems: A review. *Applied Thermal Engineering*, 115:506–521, 2021.
- [55] Rodríguez L. Mercado E., Díaz M. Economic analysis of organic rankine cycle systems for power generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154:111930, 2022.
- [56] White C. Smith J., Brown A. A review of organic rankine cycle working fluids. *Applied Energy*, 262:114455, 2020.

- [57] Yu L. Zhang Y. Zhai, H. Review on solar rankine cycle system. *Energy Procedia*, 158:1576–1581, 2019.
- [58] Pablo D Tagle-Salazar, Krishna DP Nigam, and Carlos I Rivera-Solorio. Parabolic trough solar collectors: A general overview of technology, industrial applications, energy market, modeling, and standards. *Green Processing and Synthesis*, 9(1):595–649, 2020.
- [59] A Palacios, C Barreneche, ME Navarro, and Y Ding. Thermal energy storage technologies for concentrated solar power—a review from a materials perspective. *Renewable Energy*, 156:1244–1265, 2020.
- [60] Pradeep Arjunan, Joselin Herbert Gnana Muthu, Suresh Lal Somanasari Radha, and Abhilash Suryan. Selection of working fluids for solar organic rankine cycle—a review. *International Journal of Energy Research*, 46(14):20573–20599, 2022.
- [61] Zhijian Dong, Xuemin Ye, Jintao Jiang, and Chunxi Li. Life cycle assessment of coal-fired solar-assisted carbon capture power generation system integrated with organic rankine cycle. *Journal of Cleaner Production*, 356:131888, 2022.
- [62] C Vassiliades, R Agathokleous, G Barone, C Forzano, GF Giuzio, A Palombo, A Buonomano, and S Kalogirou. Building integration of active solar energy systems: A review of geometrical and architectural characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 164:112482, 2022.
- [63] Carlos Polo Bravo and Adolfo Pérez Cruz. Construcción y caracterización de un destilador solar de una vertiente con superficie reflectora. *Ciencias*, 4(4):03–13, 2020.
- [64] George N Ike, Ojonugwa Usman, Andrew Adewale Alola, and Samuel Asumadu Sarkodie. Environmental quality effects of income, energy prices and trade: the role of renewable energy consumption in g-7 countries. *Science of The Total Environment*, 721:137813, 2020.
- [65] ENERGY EFFICIENCY RENEWABLE ENERGY. Solar radiation basics. <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-radiation-basics>, 2019.
- [66] DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA. Irradiación diaria promedio anual. <http://rayenari.geofisica.unam.mx/mauro/mapas/anual.pdf>, 2018.
- [67] Jingze Yang, Jian Li, Zhen Yang, and Yuanyuan Duan. Thermodynamic analysis and optimization of a solar organic rankine cycle operating with stable output. *Energy Conversion and Management*, 187:459–471, 2019.
- [68] Tiziana Cesca, Carlo Scian, Emilija Petronijevic, Grigore Leahu, Roberto Li Voti, Gianmario Cesarini, Roberto Macaluso, Mauro Mosca, Concita Sibilia, and Giovanni Mattei. Correlation between in situ structural and optical characterization of the semiconductor-to-metal phase transition of vo 2 thin films on sapphire. *Nanoscale*, 12(2):851–863, 2020.
- [69] Julián Blanco, Diego Alarcón, Bernardo Sánchez, Sixto Malato, Manuel I Maldonado, Astrid Hublitz, and Markus Spinnler. Technical comparison of different solar-assisted heat supply systems for a multi-effect seawater distillation unit. In *ISES solar world congress*, pages 14–19, 2003.

- [70] Vipin Nair. Hfo refrigerants: A review of present status and future prospects. *International Journal of Refrigeration*, 122:156–170, 2021.
- [71] Jinna Yu, Yuk Ming Tang, Ka Yin Chau, Raima Nazar, Sajid Ali, and Wasim Iqbal. Role of solar-based renewable energy in mitigating co2 emissions: evidence from quantile-on-quantile estimation. *Renewable Energy*, 182:216–226, 2022.
- [72] Yuhui Jin, Yan Long, Shiping Jin, Qing Yang, Bingnan Chen, Yan Li, and Lijie Xu. An energy management maturity model for china: Linking iso 50001: 2018 and domestic practices. *Journal of Cleaner Production*, 290:125168, 2021.
- [73] Jan Kaselofsky, Marika Rošā, Anda Jekabsone, Solenne Favre, Gabriel Loustalot, Michaël Toma, Jose Pablo Delgado Marin, Manuel Moreno Nicolas, and Emanuele Cosenza. Getting municipal energy management systems iso 50001 certified: A study with 28 european municipalities. *Sustainability*, 13(7):3638, 2021.
- [74] I Usman and E Sopacua. Standard energy management system pdca cycle of iso 50001 to minimize energy consumption in service operation. In *Advances in Business, Management and Entrepreneurship*, pages 549–552. CRC Press, 2020.
- [75] Raúl Alejandro Martínez-Sánchez, Juvenal Rodríguez-Reséndiz, José M Álvarez-Alvarado, and José R García-Martínez. An approach for energy and cost savings for a seafood processing plant. *IEEE Access*, 2023.
- [76] Salma El Majaty, Abdellatif Touzani, and Youssef Kasseh. Results and perspectives of the application of an energy management system based on iso 50001 in administrative buildings-case of morocco. *Materials Today: Proceedings*, 72:3233–3237, 2023.
- [77] Basit Ali, Adeel Khan, Abdullah Asif, Shehryar Khan, and Fahad Imtiaz. Chronographic implementation of energy management system in small-scale plastic industry. *Engineering Proceedings*, 20(1):3, 2022.
- [78] Raúl Alejandro Martínez-Sánchez, Juvenal Rodriguez-Resendiz, José Manuel Álvarez-Alvarado, and Idalberto Macías-Socarrás. Solar energy-based future perspective for organic rankine cycle applications. *Micromachines*, 13(6):944, 2022.
- [79] Segundo A Vásquez, Ada P Barturén, and Felix M Carbajal. Aplicación del simulador aspen hysys en la resolución de problemas del ciclo rankine regenerativo con recalentamiento intermedio. *Información tecnológica*, 31(3):199–208, 2020.
- [80] Enzo Patricio Fernández Bermúdez et al. *Análisis de factibilidad termotécnica de la incrementación del rendimiento de una planta termoeléctrica, empleando energía del proceso de condensación del ciclo Rankine como fuente térmica para la operación de motores Stirling*. PhD thesis, Universidad de Talca. Facultad de Ingeniería, 2021.
- [81] Zhe Kang, Huijiang Wang, Yang Bai, and Zhijun Wu. Thermal efficiency and boundary analysis of compression ignition internal combustion rankine cycle engine. *Case Studies in Thermal Engineering*, 50:103466, 2023.

- [82] Guilherme Scagnolatto, Luben Cabezas-Gómez, and Cristiano Bigonha Tibiriçá. Analytical model for thermal efficiency of organic rankine cycles, considering superheating, heat recovery, pump and expander efficiencies. *Energy Conversion and Management*, 246:114628, 2021.
- [83] U Caldiño Herrera, JC García, FZ Sierra-Espinosa, JA Rodríguez, OA Jaramillo, O De Santiago, and S Tilvaldiev. Enhanced thermal efficiency organic rankine cycle for renewable power generation. *Applied Thermal Engineering*, 189:116706, 2021.
- [84] Xiaoli Ma, Xudong Zhao, Yufeng Zhang, Kaixin Liu, Hui Yang, Jing Li, Yousef Golizadeh Akhlaghi, Haowen Liu, Zhonghe Han, and Zhijian Liu. Combined rankine cycle and dew point cooler for energy efficient power generation of the power plants-a review and perspective study. *Energy*, 238:121688, 2022.
- [85] Huijun Feng, Weijian Chen, Lingen Chen, and Wei Tang. Power and efficiency optimizations of an irreversible regenerative organic rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, 220:113079, 2020.
- [86] Antonio González Jiménez. La energía nuclear, esencial en la transición energética. *Industria química*, (105):12–15, 2022.

Índice de cuadros

1.1. Revisión bibliográfica realizada.	6
4.1. Implementación cronológica de una auditoría energética basado en la norma ISO 50001:2018.	27
4.2. Características técnicas analizador de red utilizado.	28
4.3. Pautas a considerar para la selección del sistema de captación solar.	34
5.1. Listado de equipos planta ORC.	40
5.2. Parámetros técnicos de la planta ORC.	46
5.3. Continuación.	47
5.4. Instrumentos de medición de temperatura, presión, flujo másico y variables eléctricas.	48
5.5. Configuración de las válvulas para diferentes modo de operación.	50
5.6. Medición de variables planta ORC en régimen de trabajo simple.	51
5.7. Medición de variables planta ORC en régimen de trabajo regeneración.	53
5.8. Continuación cuadro 5.7	54
5.9. Eficiencia térmica planta ORC en modo simple bajo condiciones de escenario 2.	59
5.10. Eficiencia térmica planta ORC en modo regeneración bajo condiciones de escenario 2.	60
5.11. Eficiencia térmica obtenidas en otros estudios.	61

Índice de figuras

1.1. Matriz de la generación de energía eléctrica por fuente [17].	4
1.2. Producción de electricidad mediante energía solar [17].	5
1.3. Propiedades físicas y químicas del refrigerante R-245-FA [25].	7
2.1. Ciclo Rankine ideal simple [17]	10
2.2. Diagrama Temperatura-Entropía (T-s) Ciclo Rankine Ideal Regenerativo [11].	12
2.3. Esquema de un ciclo de Rankine ideal con regeneración y su diagrama T-s [11]	14
4.1. Modelo PDCA basado en la norma ISO 50001:2018 [75].	25
4.2. Diagrama temperatura (T) - entropía (S) refrigerante R245fa generado con software REFPROP 9.0 académico.	30
4.3. Concepto general de sistema fotovoltaico.	31
4.4. Concepto general de sistema cilindroparabólico y reflectores lineales Fresnel.	32
4.5. Concepto de sistema de torre solar y concentrador solar.	32
5.1. Diagrama de instrumentación de la planta ORC.	41
5.2. Colector solar acoplado a etapa de regeneración en planta ORC.	43
5.3. Diagrama de válvula, equipos y sistema planta ORC prototipo.	45
5.4. Mapa de válvulas modo simple y regeneración.	49
5.5. Planta ORC prototipo con sistema solar.	50
5.6. Comportamiento de la temperatura en modo simple y regeneración visto desde el TT-01 y TT-02.	55
5.7. Comportamiento de la temperatura en modo simple y regeneración visto desde el TT-03 y TT-04.	56
5.8. Comportamiento de la temperatura en modo simple y regeneración visto desde el TT-05 y Entalpía.	57
7.1. Primer artículo publicado.	65
7.2. Segundo artículo publicado.	66
7.3. Constancia de idioma.	67
7.4. Tutoría tesis de Maestría.	68

7.5. Tutoría tesis de Maestría.	69
7.6. Participación en Coloquio XVII.	70