UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Integración de ciclos de potencia combinados con sistemas de captura y compresión de CO_2 y ciclos Rankine Orgánicos

Tesis presentada por:

PIQ Juan Carlos González González

A la Facultad de Ingeniería Química como requisito para obtener el grado de:

INGENIERO QUÍMICO

Asesor: Dr. Fabricio Nápoles Rivera

Co-asesor: MC Gerardo Geovanni Esquivel Patiño

Morelia, Michoacán Octubre 2018

Índice

LISTA DE FIGURAS ii
LISTA DE TABLAS iii
RESUMEN iv
ABSTRACT v
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 GENERALIDADES 1
2. JUSTIFICACIÓN 6
3. OBJETIVOS 7
3.1 OBJETIVOS GENERALES 7
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 7
4. HIPÓTESIS 7
5. MARCO TEÓRICO 8
5.1 INTEGRACIÓN TÉRMICA 9
5.2 OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE INTEGRACIÓN ENERGÉTICA 11
5.3 CICLO RANKINE ORGÁNICO EN UN CICLO COMBINADO Y CAPTURA DE $CO2$ 12
5.4 CICLO BRAYTON 12
5.5 CICLO RANKINE CONVENCIONAL 13
5.6 CICLO COMBINADO 15
5.7 CICLO RANKINE ORGÁNICO 16
5.8. FLUIDO DE TRABAJO 21
5.9. CAPTURA Y COMPRESIÓN DEL $CO2$ 26
5.9.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ABSORCIÓN 26
6. METODOLOGÍA 27
7. RESULTADOS 30
8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 35
9. CONCLUSIONES 38
10. REFERENCIAS 39

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Tipos de ciclos Rankine orgánicos instalados. 5
Fig. 2 Diagrama PV del ciclo Brayton. 12
Fig. 3 Diagrama T-S del ciclo Rankine convencional. 13
Fig. 4 Ciclo Rankine convencional. 14
Fig. 5 Esquema de funcionamiento de un ciclo combinado. 16
Fig. 6 Ciclo Rankine orgánico. 18
Fig. 7 Ciclo térmico integrado con el ORC. 19
Fig. 8 El primer ciclo de la integración energética corresponde al ciclo Brayton. 20
Fig. 9 Ciclo Rankine convencional funcionando con vapor de media y alta presión 20
Fig. 10 Ciclo Rankine orgánico funcionando con vapor de baja presión 20
Fig. 11 Diagrama T-S de una compresión seca. 24
Fig. 12 Comparación del fluido R245fa con otros fluidos de trabajo. 25
Fig. 13 Proceso de captura y compresión del CO2. 27
Fig. 14 Diagrama del ORC para la integración propuesta. 28
Fig. 15 Flujo másico del ciclo 1 y 2 en función de la fracción de vapor del agua. 32
Fig. 16 Trabajo generado en las turbinas 1, 2 y 3. 32
Fig. 17 Calor absorbido en función de la fracción de vapor del intercambiador de calor en el ciclo 1. 33
Fig. 18 Calor eliminado del intercambiador de calor en función de la fracción de vapor (antes del ciclo 2). 34
Fig. 19 Calor absorbido en el intercambiador de calor en función de la fracción de vapor en el ciclo 2. 34

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. *Propiedades fisicoquímicas del Pentafluoropentano.* *25*
Tabla 2. *Condiciones en las corrientes de la turbina a baja presión.* *29*
Tabla 3. *Resultados de los ciclos 1 y 2 con variación de fracción de vapor y flujo de agua.* *30*
Tabla 4. *Trabajo neto generado en los ORC.* *31*
Tabla 5. *Especificación global de corrientes frías y calientes.* *31*
Tabla 6*. Energía generada y requerida en las turbinas y compresores.* *36*
Tabla 7. *Resultados de la potencia en cada ciclo y la neta generada.* *36*
Tabla 8*. Potencia neta de los tres ciclos termodinámicos de la planta.* *37*
Tabla 9*. Resultados.* *37*
Tabla 10*. Factibilidad económica.* *38*

RESUMEN

En México las plantas de potencia de ciclo combinado son la tecnología que producen 48% de la energía eléctrica del país y tienen una proyección de crecimiento de 10% al 2025, sin embargo, siendo tecnologías dependientes de combustibles fósiles, las emisiones de gases de efecto invernadero que estas producen rebasan la capacidad de autodepuración del planeta. Por lo que es necesario buscar alternativas para la mitigación de dichas emisiones, pero a la vez satisfacer las también crecientes demandas de energía del mundo. Una alternativa viable es la captura y compresión de CO_2 sin embargo, dichos procesos tienen un impacto de 8% hasta el 11% en la eficiencia neta de la planta. Por tal motivo se propone la implementación de ciclos Rankine Orgánicos para disminuir el impacto del proceso de captura y compresión en la eficiencia de la planta. Los resultados muestran las potenciales ventajas de utilizar ciclos de aprovechamiento de calor residual para incrementar la eficiencia termodinámica y así poder operar procesos de captura y compresión reduciendo el impacto en la potencia neta generada.

PALABRAS CLAVE: Efecto invernadero, ciclos, potencia, residual, potencia, eficiencia, energía.

ABSTRACT

In Mexico, combined cycle power plants are the technology that produces 48% of the country's electric power and have a growth projection of 10% by 2025, however, being technologies dependent on fossil fuels, the emissions of greenhouse gases these produce exceed the capacity of self-purification of the planet. So it is necessary to look for alternatives to mitigate these emissions, but at the same time satisfy the growing demands of energy in the world. A viable alternative is the capture and compression of CO2; however, these processes have an impact of 8% to 11% on the net efficiency of the plant. For this reason, the implementation of Organic Rankine cycles is proposed to reduce the impact of the capture and compression process on the efficiency of the plant. The results show the potential advantages of using waste heat recovery cycles to increase the thermodynamic efficiency and thus be able to operate capture and compression processes reducing the impact on the net power generated.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El incremento en la población, así como en los estándares de vida han provocado el incremento desmedido de las demandas de energía lo cual ha producido, a su vez un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero, el agotamiento de los recursos no renovables tales como el petróleo y el carbón, Independientemente del aumento continuo del precio de los combustibles. Como una respuesta a estos problemas se han propuesto métodos o formas de incrementar la eficiencia de los ciclos termodinámicos convencionales actuales y al mismo tiempo promover la disminución del impacto ambiental. Promover el uso racional de los recursos renovables, incrementar la productividad en los diferentes sectores industriales y así contar con un mejor desempeño sustentable en los procesos.

El total de emisiones de gases de efecto invernadero en México son alrededor de 709 millones de toneladas de las cuales 493 millones corresponden a CO_2 (SEMARNAT, 2013).

El CO_2 liberado a la atmosfera por el consumo de combustibles fósiles, para producir energía proviene de todo tipo de actividades económicas, que incluyen: el sector de transformación industrial, el manufacturero, las actividades de generación de electricidad, de extracción de hidrocarburos, de refinación, entre otras actividades industriales; además del transporte, el sector agropecuario, el comercio, el sector público, y el doméstico, En 2010, el total de emisiones de CO_2

por consumo energético fue de 407.3 mega toneladas destacando las fuentes estacionarias como la generación de electricidad que contribuyó con 28 %, la industria generadora de energía (extracción, refinación, etc.) con 10 % y el 62 % el resto de la industria (SEMARNAT, 2013).

En la mayoría de los casos se utiliza combustibles fósiles (siendo los más utilizados el carbón, el gas natural y el petróleo) como fuente principal de energía y como resultado una fuente de emisión de CO_2 que contribuye en un 30 % del total de las emisiones (Edward S, y col.2002).

Con base a la información anterior se hace necesario el desarrollo de propuestas para mitigar las emisiones de bióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero.

Con los ciclos combinados aún se pierde energía en forma de calor residual debido a la irreversibilidad de los procesos de conversión de energía. Generalmente, en la mayoría de los casos el calor que se pierde se disipa al medio ambiente o en algunos casos se utilizan como servicios de enfriamiento o calentamiento según sea el caso.

La eficiencia de un ciclo Rankine convencional se encuentra en un intervalo entre 30 y 40 % (Smith y col, 2005) por lo que se ha estado tratando de incrementar su eficiencia convencional por medio de ciclos combinados con los cuales alcanzan eficiencias de más del 50 %. (Al-Sulaimana y col, 2010)

Entre las posibles soluciones para incrementar la eficiencia termodinámica de los procesos de producción de energía se encuentra el ciclo Rankine orgánico (ORC)

el cual entre sus dos principales ventajas son la simplicidad y la disponibilidad de sus componentes. En tal sistema, el fluido de trabajo es una sustancia orgánica) con peso molecular menor que el agua, un fluido orgánico con bajo peso molecular, que funciona en intervalos aproximados de temperatura entre 80 ℃ y 300 ℃ (Nápoles-Rivera y col, 2013)

En comparación con el agua, los fluidos orgánicos en un ORC tienen una mayor eficiencia a temperaturas bajas y/o cuando la planta de generación de energía es pequeña. Debido a que el agua es eficiente a altas presiones, requiere un incremento en las medidas de seguridad lo cual no es económicamente factible para plantas pequeñas (Ulli Drescher y col.2007).

En los procesos industriales se generan un porcentaje notable de gases de efecto invernadero en particular el CO_2 como resultado de usar directamente combustibles primarios, tales como el carbón, petróleo y gas natural, para obtener energía eléctrica, calor y vapor. Por otra parte, el consumo de energía en la industria química representa un porcentaje alto en los costos de operación, lo cual hace necesario incrementar la eficiencia de los ciclos térmicos en las que en ella se encuentran.

Por tal motivo cada vez es más necesario reducir o buscar alternativas para la disminución del uso de combustibles fósiles (gas natural, carbón y petróleo) o buscar la optimización de los procesos actuales con la finalidad de aprovechar mejor los recursos disponibles, es decir procesos más eficientes que produzcan más energía con una menor cantidad de emisiones. Para reducir el impacto ambiental causado por el dióxido de carbono se han propuesto métodos para la

captura de este gas, uno de ellos es la captura por medio de la absorción física y química el cual representa un método eficiente por la cantidad de CO_2 retenido.

Dentro de las propuestas está la integración térmica y el uso de ciclos termodinámicos de generación de energía con bajo nivel de temperatura. Los rangos de generación oscilan entre los 200 kW a los 15 MW eléctricos (Zitrone eneregy) de los ORC, aunque la eficiencia depende en gran medida de la temperatura de la fuente de calor disponible y la eficiencia de la turbina entre otros.

Dentro de las opciones, la mejor alternativa es el proceso de ciclo combinado y la captura del dióxido de carbono (PCC). En los ciclos termodinámicos que usan una fuente de calor de bajo nivel tal como el ciclo Rankine orgánico (ORC) el cual se puede usar para la generación de electricidad con una fuente de bajo nivel de temperatura.

Hay varias fuentes de calor residual en los cuales el ORC puede ser aplicado, como por ejemplo: el calor del condensador de una planta de vapor, de generación de energía, en procesos industriales, radiación solar, energía geotérmica y pequeñas fuentes como el motor de un automóvil (Tzu-Chen Hung, 2001). El desarrollo de fluidos orgánicos de punto de ebullición bajos ha proporcionado una vía para las tecnologías de ORC.

En la siguiente grafica se muestra la fuente de calor usado para el ciclo Rankine. Capacidad total instaladas: 523.6 MW en 75 plantas (Thomas Tartiere, 2015).

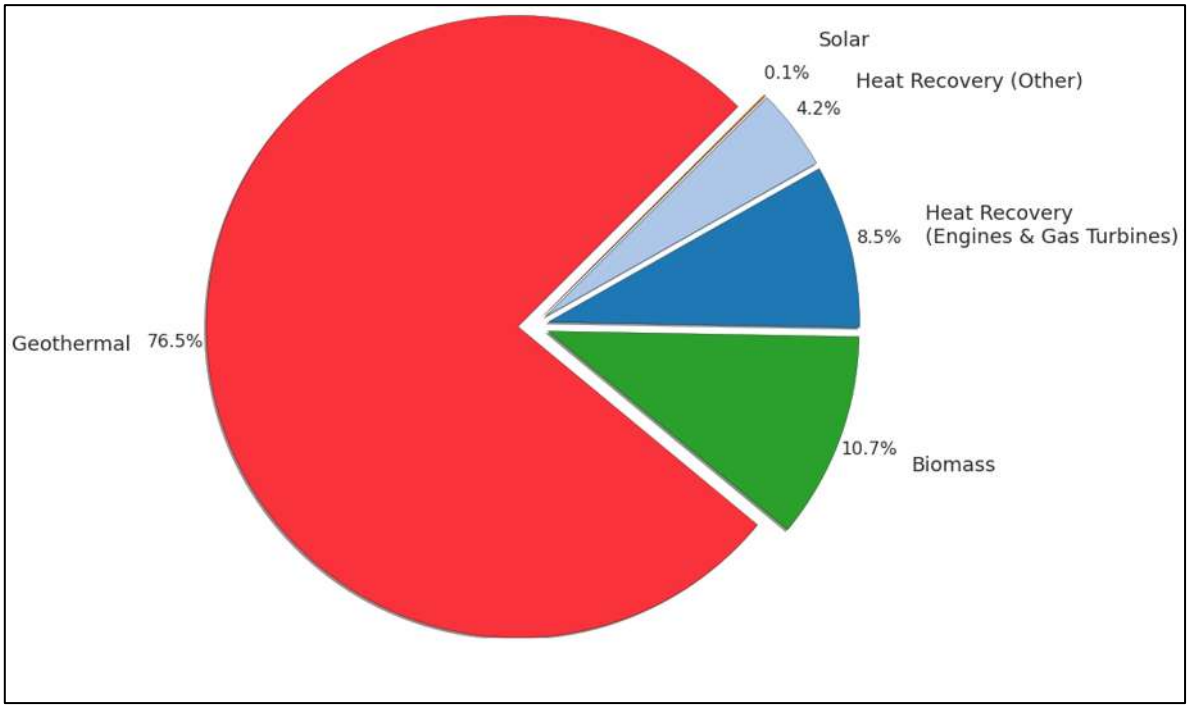

Fig. 1 Tipos de ciclos Rankine orgánicos instalados.

Las plantas geotérmicas contribuyen con el 76.5 % de todos los ORC instalados en el mundo, seguido con la biomasa con el 10.7 %, la recuperación de calor de turbinas de gas representa el 8.5 %

Por lo que en este trabajo se propone la integración de ciclos de potencia combinados con procesos de captura y compresión de CO_2 y ciclos Rankine Orgánicos a nivel industrial para el máximo aprovechamiento de la energía del proceso y la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero.

La principal limitación de la tecnología de captura y compresión es el impacto en la reducción de la eficiencia neta de la energía generada de la planta de ciclo combinado del 8 hasta el 11 % debido a la extracción de vapor a baja presión del ciclo combinado para la recuperación del absorbente y la energía requerida para la compresión del CO_2 (Esquivel Patiño y col. 2017).

Para este trabajo se pretende analizar los resultados del trabajo generado por la turbina y una cantidad de calor determinado y el ciclo ORC con un fluido de trabajo mediante el simulador Aspen Plus con el modelo UNIFAC para la integración energética y el proceso de compresión de CO_2 basado en monoetanolamina (MEA).

2. JUSTIFICACIÓN

Debido a la gran demanda de energía a nivel mundial que genera gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, es necesario analizar y proponer mejoras a los ciclos de potencia, con la finalidad de diseñar procesos integrados en los que se puedan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante procesos de captura y compresión, y a la vez se mantenga una eficiencia termodinámica aceptable. De tal manera que se satisfagan las demandas de energía y se minimice el impacto ambiental de los procesos.

Para ello se propone la integración de un ciclo de potencia combinado, integrado térmicamente con el proceso de captura y compresión y un ciclo Rankine Orgánico.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GENERALES

Optimizar ciclos potencia combinados integrados con procesos de captura y compresión de CO_2 y ciclos Rankine Orgánicos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el impacto de los procesos de captura y compresión en la eficiencia de un ciclo de potencia combinado.
- Optimizar los ciclos de potencia con sistemas de captura y compresión y ciclos de Rankine Orgánicos.
- Proponer un esquema integrado que mejore la eficiencia de los procesos actuales reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

4. HIPÓTESIS

Los ciclos de potencia combinados tienen una eficiencia aproximada de 50 %, aunado a esto la adición de sistemas de captura y compresión de CO_2 reducen dicha eficiencia, por lo que incluir sistemas de recuperación de calor residuales, puede disminuir su impacto negativo, logrando así satisfacer las demandas energéticas con menores emisiones.

5. MARCO TEÓRICO

Factores como: una alta competencia en un mercado globalizado, regulaciones ambientales más estrictas, demanda creciente de recursos naturales, y una alta exigencia de parte del consumidor final en obtener productos de alta calidad y bajo costo, hace necesaria la optimización de los procesos. La optimización se enfoca en utilizar de forma eficiente los recursos disponibles. Identificando la mejor solución posible a las oportunidades que se presenten.

La idea de aplicar los diferentes métodos de optimización es facilitar el entendimiento y el manejo de los parámetros que componen un proceso con el objetivo de desarrollar productos cada vez mejores y con costos más bajos, esta metodología utiliza un algoritmo matemático de optimización como elemento.

Ventajas:

- La optimización permite encontrar mejores configuraciones de un sistema.
- La simulación permite el control y ensayo de un gran número de escenarios necesarios en los procesos antes de implementar realmente una decisión en particular en el entorno real.
- La optimización de procesos permite reducir o eliminar la pérdida de tiempo y recursos, gastos innecesarios, obstáculos y errores.

5.1 INTEGRACIÓN TÉRMICA

La integración térmica en un proceso industrial consiste en recuperar la mayor parte de calor disipado por el mismo proceso, el cual en una configuración simple no es posible hacerlo, basado en esta premisa, la utilización de una red de intercambio de calor adecuado de tal manera que optimice al máximo la recuperación de calor, y que al mismo tiempo sea medible para asegurar que no impacten el costo de la configuración de la red. En los métodos tradicionales se obtienen como resultado costos altos por los servicios y equipos no haciendo rentable la recuperación máxima de calor.

Existen varios métodos de integración energética para lograr este objetivo, entre los que se destacan: métodos heurísticos, métodos basados en el conocimiento, y métodos termodinámicos, aunque no dejan de presentar sus limitaciones.

El reto principal de los modelos actuales es tener una red con una configuración que demande lo menos intercambiadores de calor posibles, minimizar el área de transferencia de calor, es decir no encarecer el costo de la red.

Uno de los modelos que ha presentado buenos resultados en la actualidad con respecto a los tradicionales es de Análisis “Pinch” el cual se utiliza para identificar los costos energéticos, los costos de capital de una red de intercambio de calor; una de las principales ventajas de este método de análisis sobre los métodos convencionales, es que se puede establecer objetivos económicos de energía y capital para procesos individuales o en general de producción previo a su diseño. A pesar de las ventajas del método Pinch, esté no deja de ser un método

secuencial para lograr los objetivos de minimización servicios externos, número de unidades de intercambio de calor y área de los intercambiadores. En contraste se tienen los métodos simultáneos basados en programación matemática que consideran los tres aspectos al mismo tiempo, ofreciendo con bajos tiempos de computo, soluciones óptimas al problema de síntesis de redes de calor (T. F. YEE and I. E. Grossman ,1990). El análisis Pinch representa un conjunto de métodos termodinámicos que garantizan un nivel de energía mínimo en el diseño de redes de intercambiadores de calor que se utiliza para estudiar procesos industriales, esta tecnología presenta una metodología simple para el análisis sistemático de los procesos químicos y de los servicios auxiliares, con la ayuda de la primera y segunda ley de la termodinámica. El análisis Pinch se utiliza para identificar los costos energéticos, los objetivos de costo de capital de una red de intercambio de calor y para reconocer el punto" Pinch".

1. El procedimiento primero predice los requerimientos mínimos de energía externa, área de la red y número de unidades para un proceso dado en el punto "Pinch".
2. Posteriormente se diseña una red de intercambio de calor que satisfaga esos objetivos.
3. Finalmente, la red se optimiza mediante la comparación de costos energéticos y los costos fijos de las redes de tal manera que el costo total anual sea mínimo.

El punto de partida para un análisis de integración energética es el cálculo de los requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento para una red de

intercambio de calor. Para hacer el análisis de una red de intercambio de calor primero de identifica las fuentes de calor y los sumideros que son las corrientes calientes y frías respectivamente en el proceso.

Curvas compuestas

Las curvas compuestas son graficas temperatura-entalpia, se usan para establecer objetivos energéticos, son perfiles de temperatura (T) y entalpia (H) que muestran la disponibilidad de calor (curva compuesta caliente) y la demanda de calor (curva compuesta fría) en una representación gráfica. Para que exista intercambio de calor, la curva compuesta caliente tiene que estar en una posición en la que siempre se encuentre arriba de la curva compuesta fría.

5.2 OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE INTEGRACIÓN ENERGÉTICA

En un proceso de redes de intercambiadores de calor es importante verificar que la configuración de las redes de intercambiadores esté diseñada eficientemente.

Esta verificación puede realizarse mediante los métodos existentes de optimización; para ello se puede proceder de acuerdo a alguna de las siguientes tres opciones (Jiménez Gutiérrez, 2003):

1. Formular un problema de diseño y pre optimizar $\Delta Tmin$. Usar ese valor para revisar la red.
2. Examinar la red existente y detectar la menor diferencia de temperaturas que se tenga en alguno de los intercambiadores de calor, usar ese valor como $\Delta Tmin$ para la revisión de la red.

3. Usar algún tipo de pronóstico del efecto $\Delta Tmin$ en la red al revisarse. Cabe la posibilidad de usar algún valor heurístico de $\Delta Tmin$ de acuerdo a la experiencia y conocimiento del escenario económico de algún diseñador.

5.3 CICLO RANKINE ORGÁNICO EN UN CICLO COMBINADO Y CAPTURA DE CO_2

Un ciclo combinado o de cogeneración se define como la unión de un ciclo Brayton de gas de alta temperatura con un ciclo Rankine de temperatura media y del ciclo Rankine orgánico de baja temperatura.

5.4 CICLO BRAYTON

La turbina trabaja con gas mediante el suministro de aire por medio de un compresor y se somete a un calentamiento y compresión el cual convierte la energía mecánica en eléctrica. Los equipos básicos de operación usados son un compresor, un horno, y una turbina de gas (J.M Smith y col, 2005).

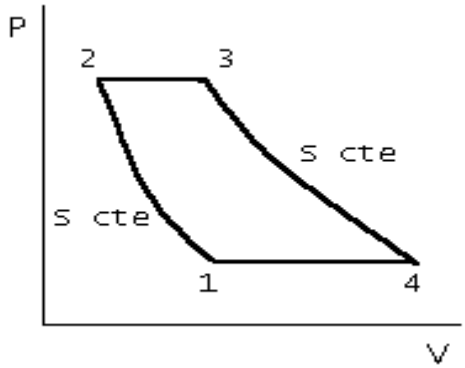

Fig. 2 Diagrama PV del ciclo Brayton.

Diagrama ideal del ciclo Brayton en el que se muestra el proceso:

- En la primera etapa de 1 a 2 se da la compresión adiabática y calentamiento del gas a elevada temperatura.
- En la etapa de 2 a 3 es la compresión isobárica y de 3 a 4 la expansión adiabática

5.5 CICLO RANKINE CONVENCIONAL

La turbina trabaja con vapor donde se relaciona el consumo de calor con la producción de trabajo o creación de energía a partir de vapor de agua.

Consiste en las cuatro etapas que se presentan en la figura (J.M Smith y col, 2005) y se describen a continuación:

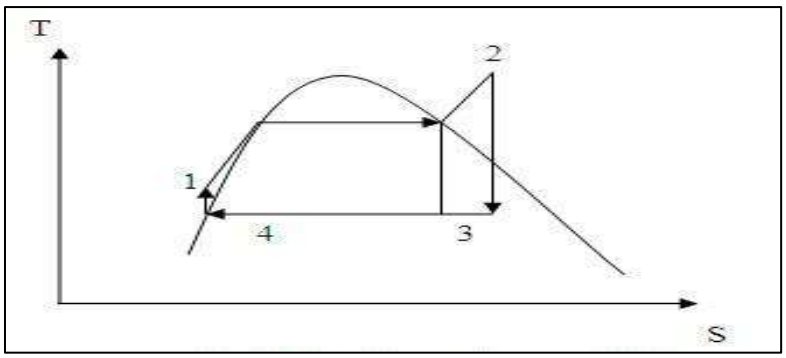

Fig. 3 Diagrama T-S del ciclo Rankine convencional.

Equipos utilizados en un ciclo Rankine convencional.

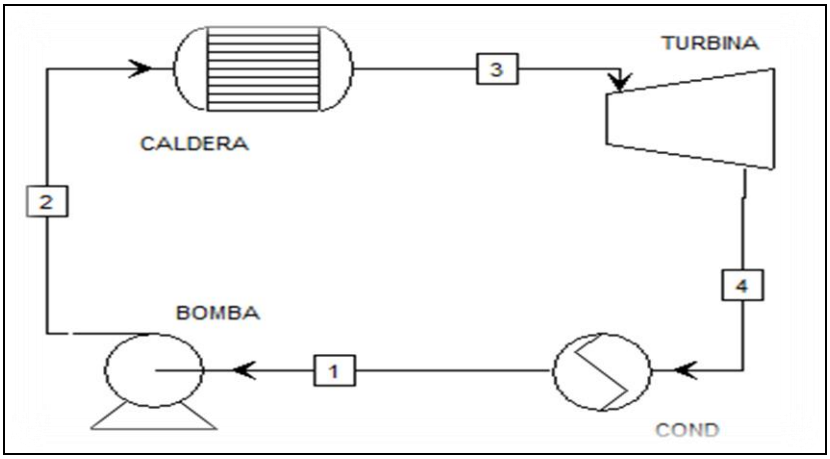

Fig. 4 Ciclo Rankine convencional.

1. 2 a 3 procesos de calentamiento a presión constante en una caldera. La etapa se halla a lo largo de una isobara (la presión de la caldera) y consta de tres secciones: calentamiento del agua líquida subenfriada hasta su temperatura de saturación, vaporización a temperatura y presión constantes y sobrecalentamientos del vapor a una temperatura muy por arriba de su temperatura de saturación.
2. 3 a 4 expansión adiabática (isotrópica), reversible, del vapor en una turbina hasta la presión del condensado. La etapa normalmente cruza la curva de saturación, lo cual produce una descarga húmeda.
3. 4 a 1 proceso a presión y a temperatura constante en un condensador para producir líquido saturado en el punto 1.
4. 1 a 2 bombeo adiabático(isotrópico) reversible del líquido saturado hasta la presión de la caldera, que produce liquido comprimido (subenfriado)

Se propone una integración entre el ciclo, Brayton, Rankine y orgánico de tal forma que el calor residual del horno del primer ciclo haga funcionar el segundo

ciclo el cual estarían interconectados con la caldera donde se generaría vapor necesario para hacer funcionar al ciclo, sin embargo en este ciclo aún hay un intervalo de calor que se podría utilizar para generar más energía en analogía con el primer y segundo ciclo, es ahí precisamente donde se propone la implementación del ciclo Rankine orgánico en el cual funcionaria con los mismos equipos que el Rankine, pero que estarían diseñados con una capacidad menor de trabajo, ciertamente se generaría menos energía que en el primer y segundo ciclo pero aun así se generaría una cantidad de energía significativa la cual permitiría la disminución del consumo de energía en el proceso y por consiguiente más eficiente.

5.6 CICLO COMBINADO

Un ciclo combinado es un proceso de producción de energía eléctrica basado en dos máquinas térmicas, de dos ciclos térmicos diferentes, una turbina de gas y la otra de vapor (Ciclo Brayton y Rankine) el calor que no se utiliza por uno de los ciclos (ciclo Brayton) se emplea como fuente de calor del otro (Ciclo Rankine). De esta forma los gases provenientes de la turbina de gas entregan la energía necesaria para el funcionamiento del ciclo de vapor acoplado. Esta configuración permite el uso eficiente de combustible en rendimientos que superan el 50 %, además de la generación de energía eléctrica también puede ser utilizada para la obtención de vapor de proceso.

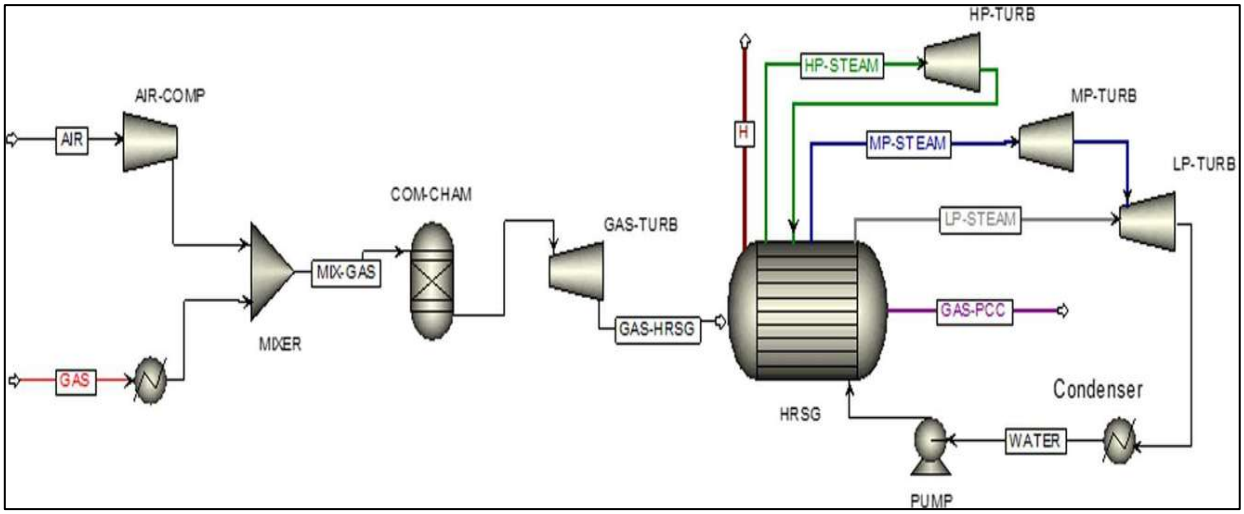

Fig. 5 Esquema de funcionamiento de un ciclo combinado (Nápoles Rivera Fabricio y col, 2013).

Los gases calientes que salen de la turbina del ciclo Brayton a altas temperaturas ingresan a la caldera de recuperación. En esta caldera de recuperación se produce el intercambio de calor entre los gases calientes de escape y el agua a alta presión del ciclo de vapor es decir el aprovechamiento de calor llevando la temperatura de los gases al valor más bajo posible.

5.7 CICLO RANKINE ORGÁNICO

El ciclo orgánico es una modificación del ciclo Rankine convencional, el cual utiliza el calor residual de un ciclo convencional para que por medio de un ciclo termodinámico convierta el calor en electricidad utilizando un fluido de trabajo orgánico que tiene un punto de ebullición menor al del agua y una presión de vapor más alta que el agua por lo que hace posible trabajar con una fuente de calor inferior y hacer funcionar la turbina para generar energía, la eficiencia del ciclo dependerá de la cantidad de calor residual recuperado, el cual lo hace el

parámetro más importante, además de la calidad del mismo del ciclo Rankine convencional y la eficiencia del fluido orgánico.

Los principales objetivos del ciclo Rankine orgánico son (Sylvain Quoilin y col, 2013)

A) Conversión del calor residual en energía eléctrica que permite hacer una mejora en el uso del combustible primario.
B) Reutilizar el calor producido por los combustibles primarios debido al nivel de calor alto que este puede alcanzar.

Los equipos básicos que componen el ORC son:

1. Intercambiador de calor
2. Una turbina
3. Compresor
4. Condensador

El proceso de generación de energía es el siguiente:

- Del ciclo Rankine convencional (fuente de calor) transfiere el calor al fluido orgánico por medio del evaporador hasta llegar a vapor sobrecalentado.
- Posteriormente el fluido se expande en la turbina convirtiendo el calor en energía mecánica y la turbina a su vez convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica.

- El fluido sale de la turbina como vapor sobrecalentado hacia el condensador donde transfiere su calor a otro fluido de menor temperatura en donde pasa a líquido saturado.
- Otra ventaja respecto al agua en el ciclo convencional es que el fluido orgánico permanece sobrecalentado después de la expansión por lo que no es necesario llevarlo nuevamente a este estado.
- El ciclo se cierra cuando está como líquido saturado se regresa al evaporador para continuar con el ciclo.

El ciclo Rankine orgánico trabaja en cuatro etapas como se muestra en la siguiente figura y como se describe a continuación.

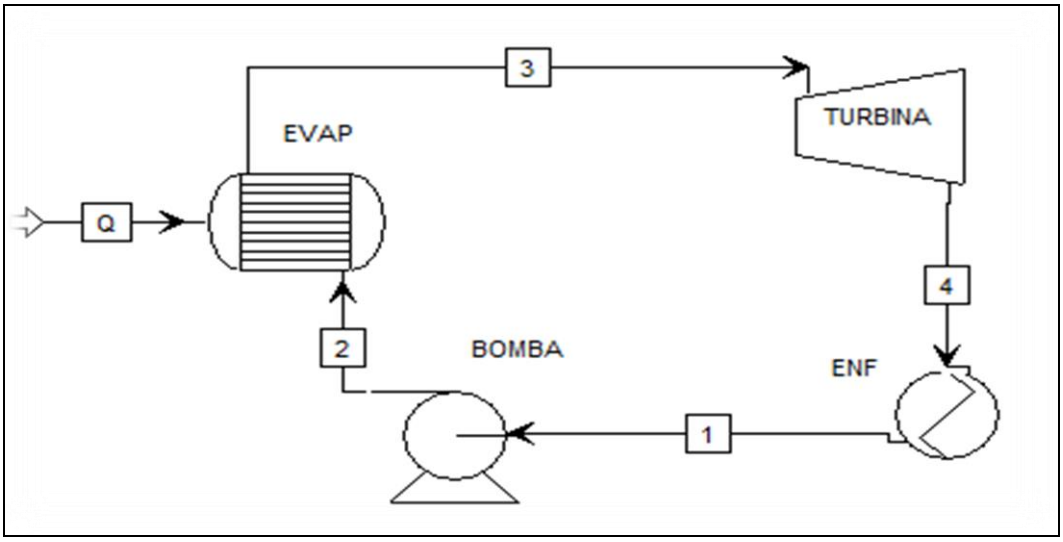

Fig. 6 Ciclo Rankine orgánico.

2 a 3 procesos de calentamiento a presión constante en una caldera que consta de tres secciones: calentamiento del fluido orgánico subenfriada hasta su temperatura de saturación, vaporización a temperatura y presión constante

y sobrecalentamientos del vapor a una temperatura muy por arriba de su temperatura de saturación.

a) 3 a 4 expansión adiabática reversible, del vapor en una turbina hasta la presión del condensado.

b) 4 a 1 proceso a presión y a temperatura constante en un condensador para producir líquido saturado en el punto 1.

c) 1 a 2 bombeo adiabático reversible del líquido saturado hasta la presión de la caldera, que produce liquido comprimido (subenfriado).

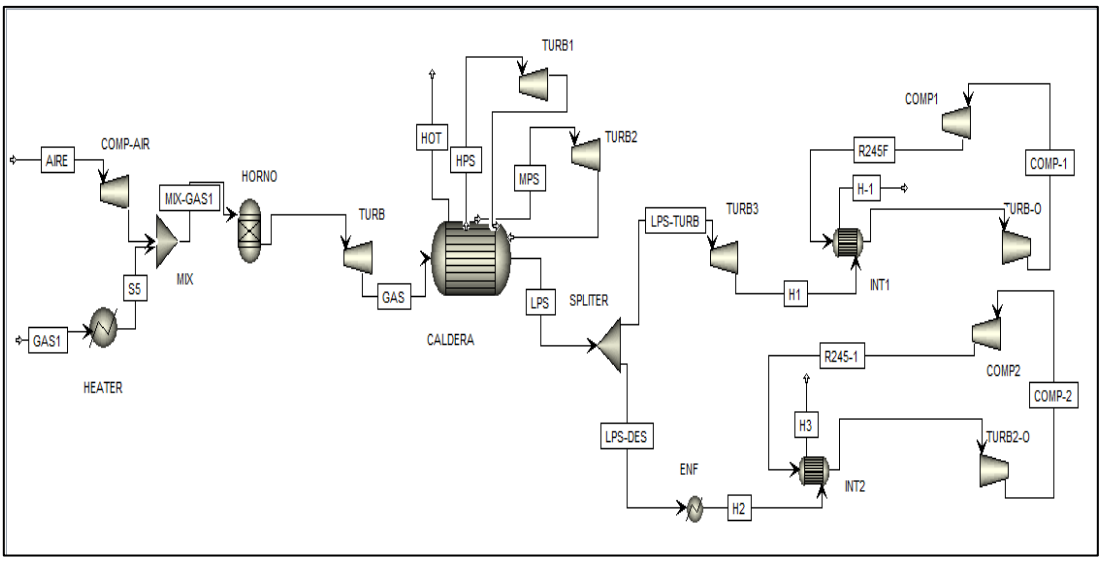

Fig. 7 Ciclo térmico integrado con el ORC. Diferencia entre LPS-TURB y LPS-DES. En la Figura 5 se aprecia los tres ciclos termodinámicos.

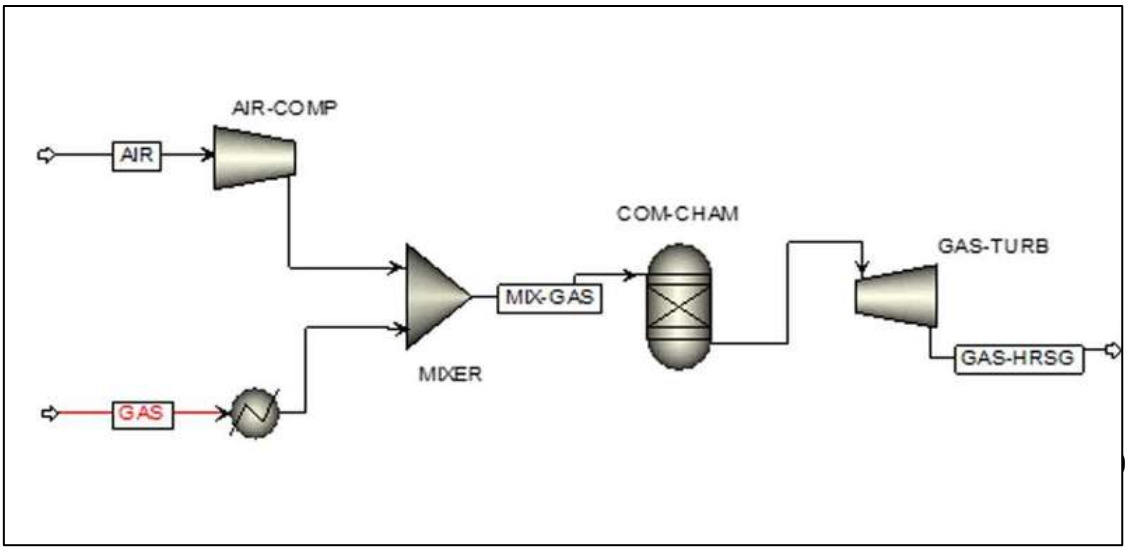

Fig. 8 El primer ciclo de la integración energética corresponde al ciclo Brayton.

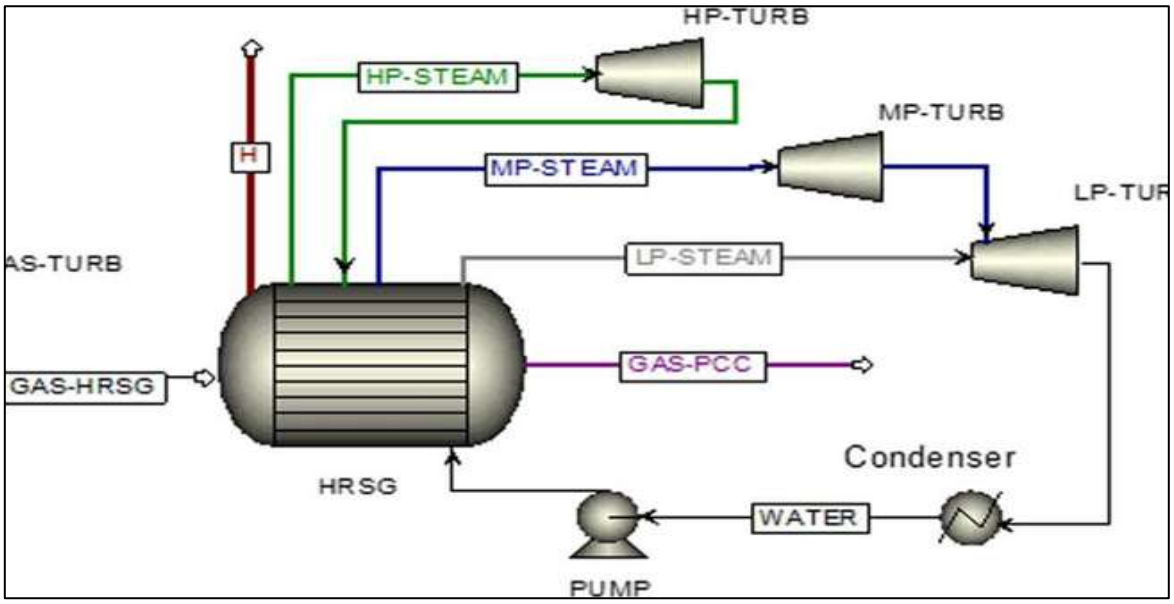

Fig. 9 Ciclo Rankine convencional funcionando con vapor de media y alta presión

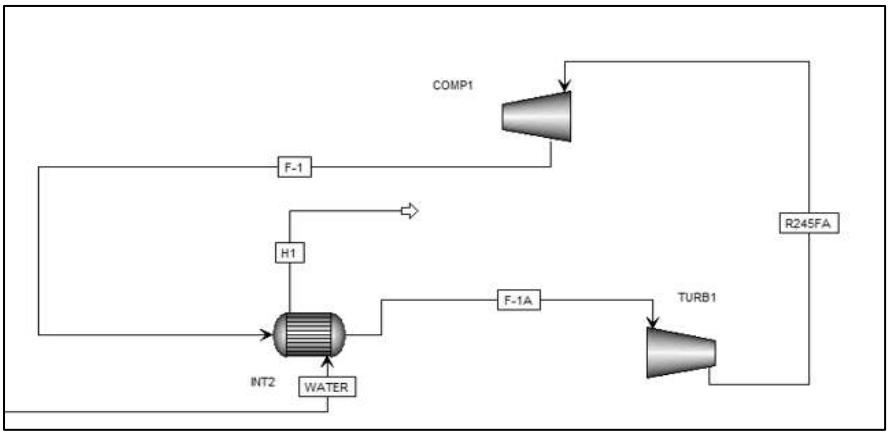

Fig. 10 Ciclo Rankine orgánico funcionando con vapor de baja presión

Como se aprecia en la Figura 10 la configuración del ORC es diferente al descrito anteriormente, este caso no se utiliza el enfriador en la corriente de salida de la

turbina ni la bomba, en este caso es un compresor, esto es debido a las condiciones termodinámicas de la corriente de vapor a elevada temperatura, a las propiedades del fluido orgánico en condiciones de vapor sobrecalentado, y a la velocidad de flujo de la corriente del fluido de trabajo, lo que genera cierto error en la bomba a la hora de correr la simulación del proceso.

Ventajas del ciclo Rankine orgánico:

- La simplicidad y la disponibilidad de sus componentes.
- Alta eficiencia en el ciclo termodinámico.
- Ausencia de humedad durante la expansión del vapor, responsables de la erosión en los interiores de la turbina.
- Presión de evaporación más baja,
- Presión de condensación más alta,
- Densidad de fluido más alta,
- Procedimiento simple requiere sobrecalentamiento,
- Recuperación de calor a baja temperatura,
- Larga vida de la planta (20 años aproximadamente).

5.8. FLUIDO DE TRABAJO

Varios autores han propuesto varios enfoques para la selección de fluidos orgánicos. Los fluidos de trabajo se clasifican en húmedos, secos e isentrópicos, de acuerdo al diagrama T-S, es decir, pendiente negativa, positiva e infinita, respectivamente. Los sistemas de ORC operan entre 40°C y 300°C y presiones por lo general, limitadas a 20 bar, aunque en ocasiones se consideran presiones

supercríticas. La elección del fluido de trabajo más apropiado dependerá de la temperatura de la fuente de calor, de los alrededores y de las temperaturas de las corrientes de enfriamiento.

Similar a los ciclos convencionales, la eficiencia de conversión de energía de un sistema ORC está limitada por la irreversibilidad debida a los cambios de entropía en el sistema y del ambiente durante las diferentes etapas del ciclo. La irreversibilidad y la eficiencia del sistema dependen de los fluidos de trabajo y las condiciones de trabajo, por lo tanto, una eficiencia satisfactoria del sistema se puede lograr una vez que el fluido de trabajo y las condiciones de trabajo están debidamente seleccionadas.

Los fluidos de trabajo de tipo seco o isentrópico son los más apropiados para los sistemas ORC (Sylvain Quoilin Y COL, 2011) debido a que son fluidos sobrecalentados después de la expansión isentrópica y evita la formación de gotas de líquido al interior de la turbina.

Para la selección del fluido orgánico más apropiado se han tomado varios criterios generales entre los cuales incluyen:

- Propiedades termodinámicas
- Estabilidad del fluido y compatibilidad con los materiales en contacto,
- Seguridad, condiciones y aspectos ambientales,
- Disponibilidad y costos.

Criterios apropiados para la selección del fluido de trabajo se consideran los siguientes:

- **condiciones termodinámicas**

- Temperatura crítica alta.
- Alta presión critica.
- El calor latente de vaporización debe ser lo más pequeño posible para disminuir la irreversibilidad en el proceso de transferencia de calor.
- La diferencia de calor entre la fuente de calor y la del fluido de trabajo debe ser pequeña es decir temperatura alta de ebullición.
- El punto de congelación debe ser más bajo a la temperatura más bajo del ciclo,
- Alta densidad de vapor.
- Una curva T-S apropiada este es un parámetro muy importante ya que indica que fluidos tienen formación de líquido en la turbina.
- Fluidos secos es decir $\frac{dS}{dT} > 0$ o isentropicos es decir $\frac{dS}{dT} = cte.$

- **Aspectos ambientales**

    - El fluido debe ser no inflamable.
    - No toxico.
    - No corrosivo.
    - Fácil detección de fugas.
    - Compatibilidad con el material de trabajo.

Para la selección óptima del fluido dependerá en gran medida de la temperatura disponible de la fuente de calor en este caso se considera un rango entre $85\,℃$ a 350℃.

Con base a los criterios señalados el fluido puro candidato para el ORC es Hidrofluorocarbono (HFCs), o 1, 1, 1, 3,3-Pentafluoropropano con nombre alternativo R-245fa. Con temperatura mínima de 85 ℃ se considera el más óptimo (J. Baoy col.2013).

La ventaja R245fa es que ha sido utilizado en plantas de generación de electricidad, es considerada un fluido de trabajo de temperatura baja usado principalmente en recuperación de calor residual. Además, este fluido R245f es un fluido seco lo que favorece al proceso.

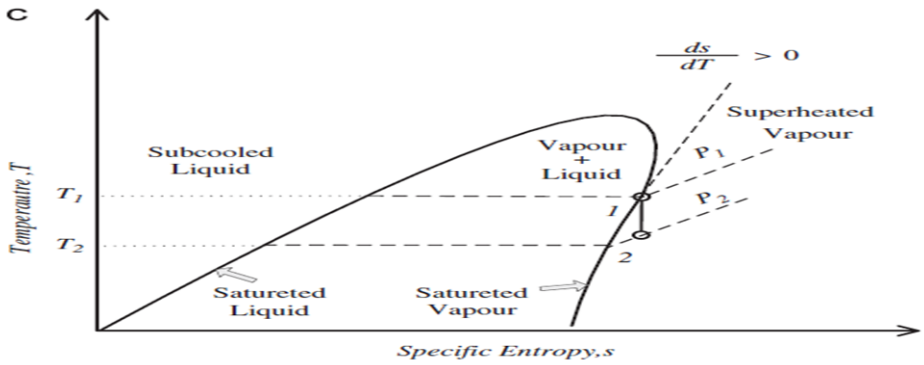

Fig. 11 Diagrama T-S de una compresión seca (Yiping Dai y col, 2009).

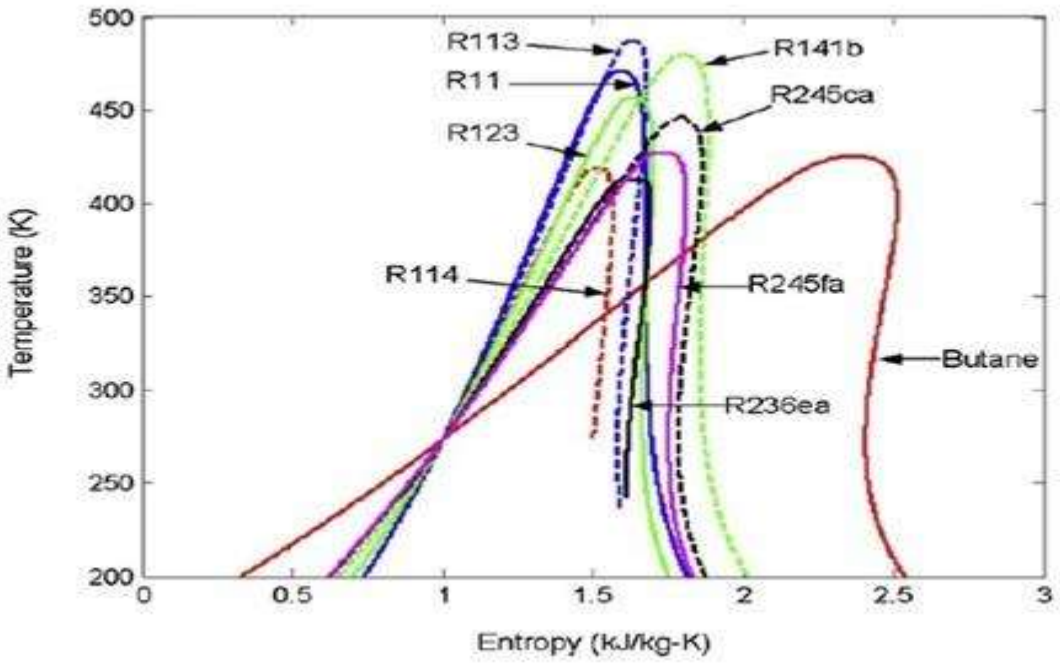

Fig. 12 Comparación del fluido R245fa con otros fluidos de trabajo (*Yiping Dai* y col, 2009).

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del Pentafluoropentano.

Propiedades fisicoquímicas del Pentafluoropropano (HFC-245fa)	
Masa molecular	134.0 g/mol
Punto de ebullición	15.3 ℃
Densidad del liquido	1.32 g/cm3 a 20 ℃
Punto de congelación	-107 ℃
Presión de vapor	123 Kpa 20 ℃
Temperatura critica	153.86 ℃
Temperatura de auto ignición	412 ℃
Estado físico	Gas licuado
Potencial de destrucción de ozono(ODP)	0
Solubilidad en agua	0.13 g/L.
Color	Incoloro

Ventajas y desventajas del fluido orgánico R245fa:

Ventajas

- Baja toxicidad,
- No daña ozono,
- No es reactivo y corrosivo para todos los metales comúnmente usados en el equipo de procesamiento de poliuretano incluyendo acero al carbono, acero inoxidable, cobre y latón.

Desventajas

- tiene un alto potencial de calentamiento global.
- Es prácticamente no biodegradable con una vida promedio de 7.2 años

5.9. CAPTURA Y COMPRESIÓN DEL CO_2

5.9.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ABSORCIÓN

El proceso de captura del CO_2 por medio de la absorción a contracorriente con un fluido en este caso un radical libre. Utilizando un reactivo alcalino que reacciona químicamente con los gases ácidos (Edward S. y col, 2001).

La monoetanolamina (MEA) el dióxido de carbono reacciona con el solvente (en este caso amina) en la torre de absorción. Posteriormente esta mezcla es enviada a una torre de separación en la cual se aporta calor con la ayuda de vapor para invertir la reacción de absorción de CO_2. De esta manera, el CO_2 se comprime para

su posterior almacén y el solvente se recicle a la etapa de adsorción. Cabe resaltar el reciclado o recuperación del solvente amina es importante debido al costo del mismo.

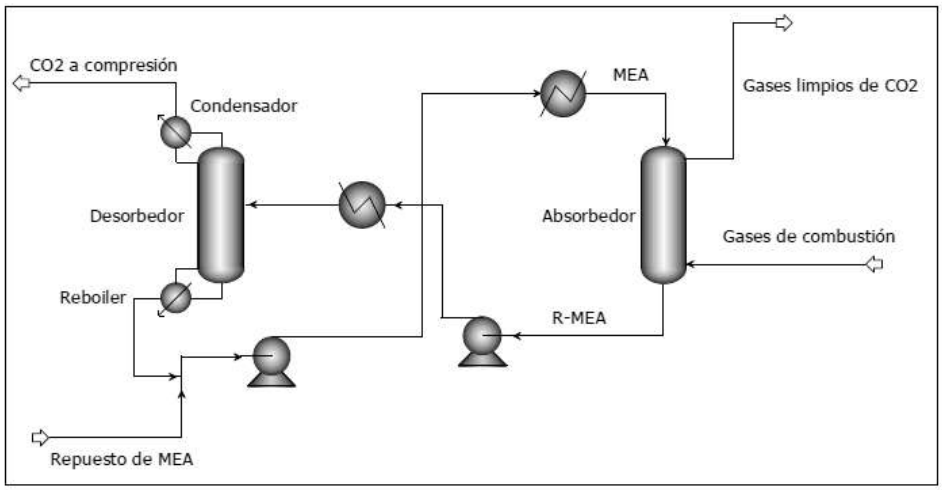

Fig. 13 Proceso de captura y compresión del CO_2.

6. METODOLOGÍA

El proceso de recuperación de calor consiste en utilizar el calor remanente en la turbina de baja presión en un ciclo Rankine convencional a través de un ciclo Rankine orgánico (ORC) el cual todavía es aprovechable gracias a que el ORC trabaja en condiciones más bajas de temperatura y presión comparada con un ciclo convencional.

Para la corriente de baja presión (LP) se coloca un separador (S-1) de corrientes antes de la turbina (LPT) el cual en virtud de las condiciones de flujo, presión y temperatura es posible acoplar dos ORC, el primero el que sale de la turbina (LPT), y el segundo sale del separador de corrientes y el cual se coloca antes del

ciclo un intercambiador de calor (ENF) esto con la finalidad de en primer lugar transferir parte del calor a la corriente de CO_2 y amina en el proceso de captura para desorber el CO_2 para su posterior compresión y para recuperar la corriente de amina la cual se recircula a la torre de absorción.

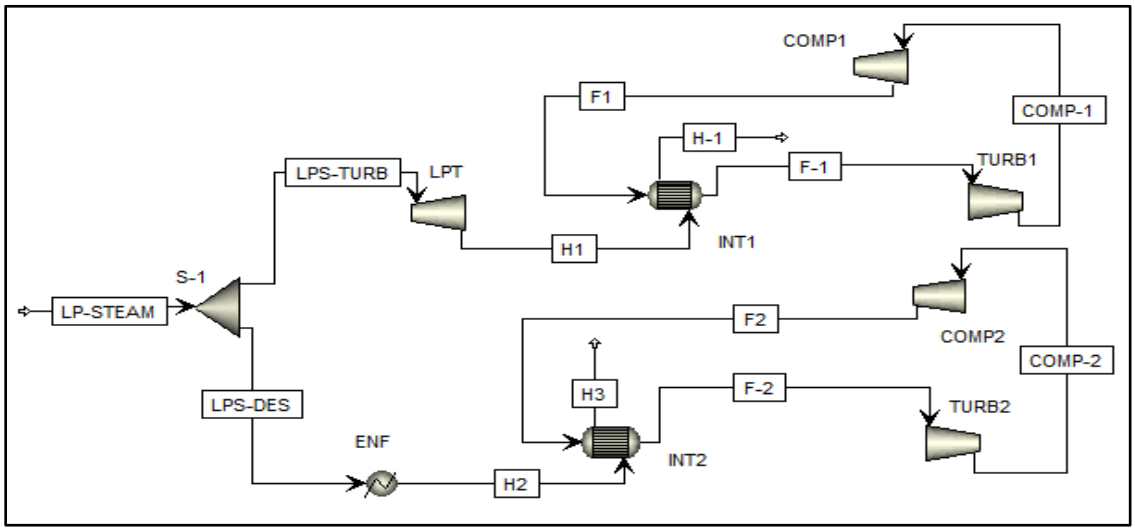

Fig. 14 Diagrama del ORC para la integración propuesta.

El análisis se realiza a partir de las condiciones de la corriente entrada (LP-STEAM) que incluye la turbina (LPT), su ciclo posterior ORC y de la corriente que sale del separador (S-1), segundo ciclo OCR. Lo anterior nos permite realizar una simulación con la ayuda de Aspen Plus variando la fracción de vapor en cada corriente LPS-TURB y LPS-DES también variando la cantidad de flujo del refrigerante con la finalidad de ver hasta cuanto es posible cambiar la fracción de vapor y hacia donde aumentar en cualquiera de las dos corriente y en la otra disminuir a manera de obtener la configuración que más nos convenga.

Para los resultados obtenidos se partió de esas condiciones de flujo másico de agua, temperatura y presión de estas corrientes.

Tabla 2. Condiciones en las corrientes de la turbina a baja presión.

	CORRIENTE		
PARAMETRO	LP-STEAM	H1	LPS DES
Flujo total kg/hr	399169	199585	199585
Temperatura C	309.1	207.5605	303.4151
Presión bar	5.81	0.5	1

El análisis de sensibilidad variando la fracción de vapor desde del divisor de 0.1 hasta 1 también nos da un panorama del cambio de calor en los intercambiadores de calor, y el trabajo generado en las turbinas.

7. RESULTADOS

Se realizó la simulación en Aspen Plus analizando el ORC desde el separador de corrientes, en el cual una se dirige a los ciclos (F1) y (F2) respectivamente.

Tabla 3. Resultados de los ciclos 1 y 2 con variación de fracción de vapor y flujo de agua.

X	F1	F2	w1	w2	w3	Q1	Q2	Q3
0.1	30000	90000	-2094	-1192	-336	720663	-60540269	1613407
0.2	60000	80000	-4188	-2348	-298	1441326	-53813652	1434027
0.3	90000	70000	-6281	-3575	-261	2161990	-47087035	1254653
0.4	120000	60000	-8375	-4767	-224	2882655	-40360180	1075289
0.5	150000	40000	-10469	-5959	-155	3603325	-33633563	733293
0.6	180000	30000	-12563	-7151	-116	4323971	-26906707	549795
0.7	200000	20000	-14657	-7945	-77	4804409	-20180114	366318
0.8	220000	10000	-16750	-8740	-39	5284872	-13453401	182878
0.9	250000	9000	-18844	-9932	-35	6005517	-6726713	164535

F1 flujo másico en el ciclo 1 y F2 en el ciclo 2 en, kg/h. W, trabajo generado en las tres turbinas, W1 corresponde a la turbina del ciclo Rankine de baja presión (LPT), W2 corresponde a la turbina del primer ciclo Rankine orgánico (TURB1) y W3 al segundo ORC (TURB2) los tres en kW. Q calor cedido o absorbido en los intercambiadores de calor y el enfriador, Q1 corresponde al intercambiador 1(INT1), Q2 corresponde al enfriador (ENF) 2 Q3 al intercambiador 2 en el segundo ORC

Tabla 4. Trabajo neto generado en los ORC.

Trabajo neto			
X	**F1**	**F2**	**W**
0.1	30000	90000	-3622
0.2	60000	80000	-6834
0.3	90000	70000	-10117
0.4	120000	60000	-13366
0.5	**150000**	**40000**	**-16583**
0.6	180000	30000	-19830
0.7	200000	20000	-22679
0.8	220000	10000	-25529
0.9	250000	9000	-28776

En la Tabla 4 se presenta la información del trabajo neto generado en la turbina del ciclo Rankine a baja presión y en los ciclos Rankine orgánico (ORC) al variar la fracción de vapor de agua en el mezclador y al variar el flujo del refrigerante. F1 es el flujo del refrigerante en el ciclo 1 y F2 es el flujo del refrigerante en el ciclo 2.

En este caso únicamente se toma en cuenta para la fracción de vapor de 0.5 ya que es factible tanto económica como termodinámicamente.

Tabla 5. Especificación global de corrientes frías y calientes.

Corriente	**Tipo**	T_{in} ℃	T_{out}℃	**FCP** (Kw/K)
H1	Caliente	207.56	197.92	264.75
H2	Caliente	303.41	128.8	109.30
H3	Caliente	128.8	115.35	806.130
F1	Fría	193.61	197.56	239.202
F2	Fría	106.71	118.8	261.06

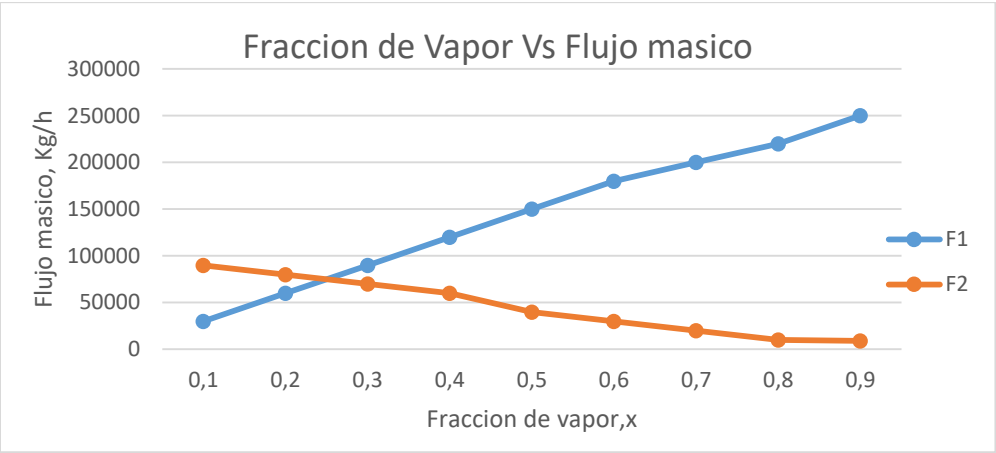

Fig. 15 Flujo másico del ciclo 1 y 2 en función de la fracción de vapor del agua.

Se apreciar en la gráfica los flujos del refrigerante con respecto a la fracción de vapor F1 Y F2 de los ciclos 1 y 2 respectivamente. En el flujo de refrigerante en el ciclo 1 (F1) se pude llegar hasta un valor más grande respecto a F2 y obtener mayor trabajo en la turbina, es decir que en F2 por más que se incremente el flujo no es posible obtener más trabajo en la turbina en el ciclo debido a las condiciones termodinámicas de la corriente H2.

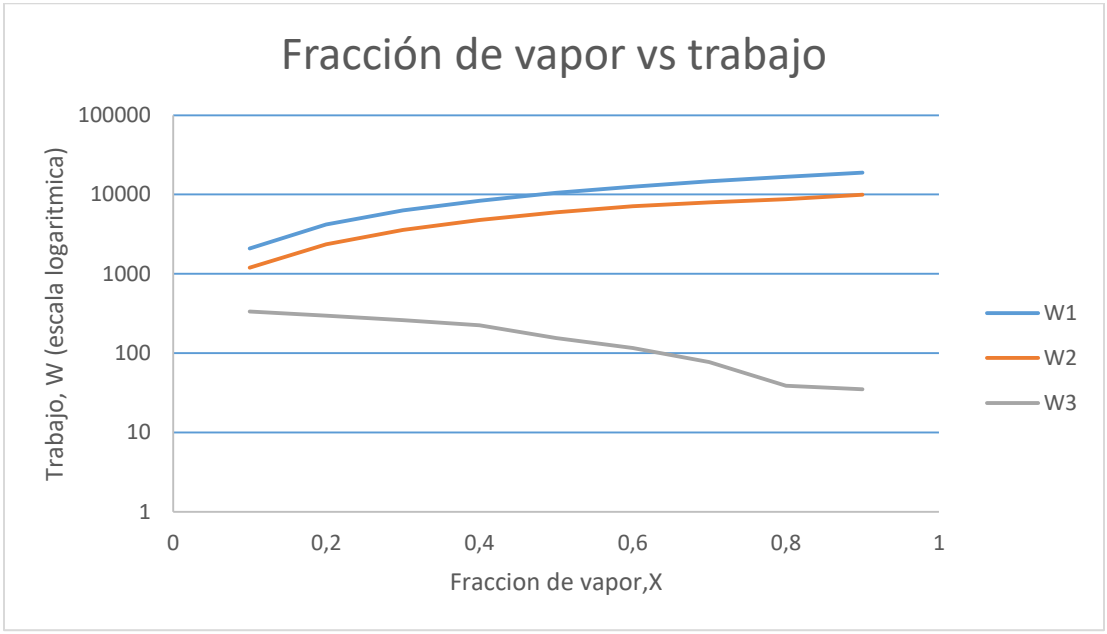

Fig. 16 Trabajo generado en las turbinas 1, 2 y 3.

En la Gráfica 1.16 aprecia el incremento de trabajo con respecto al incremento de la fracción de vapor en el caso de W1 flujo de que corresponde a la turbina de baja presión (LPT), W2 al primer ORC de la corriente H1 se aprecia que se genera trabajo significativo respecto a W1, por otra parte W3 se ve claramente la diferencia entre W1 Y W2 no depende directamente de la fracción de vapor debido a las condiciones de vapor y temperatura en la corriente H2 y tampoco del flujo de refrigerante, esto debido al intercambio de calor que se tiene antes del ciclo.

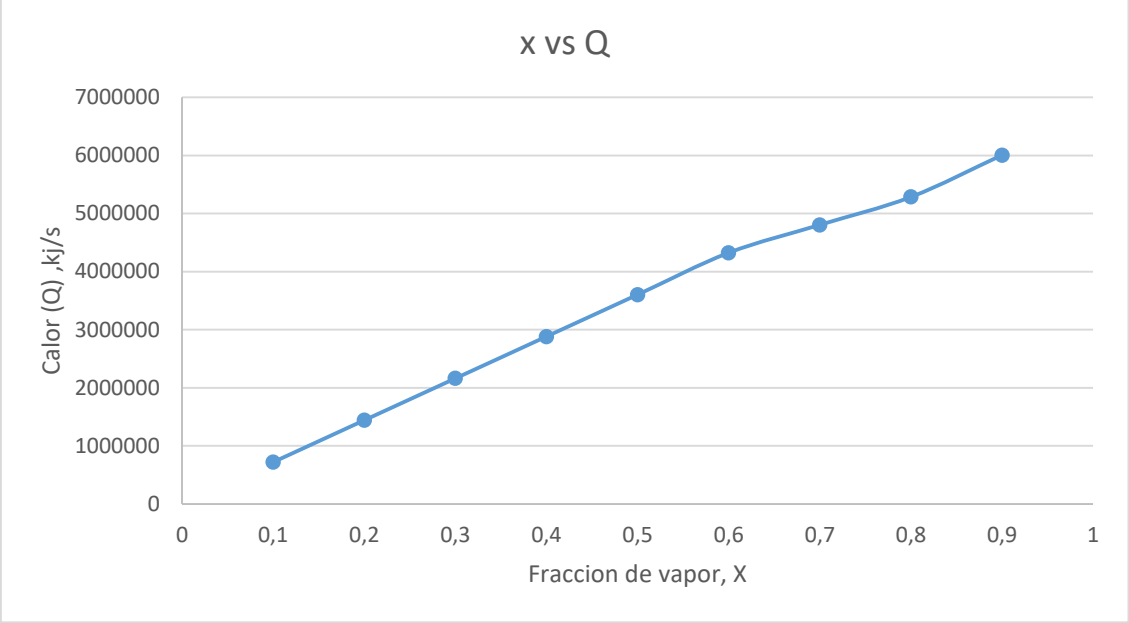

Fig. 17 Calor absorbido en función de la fracción de vapor del intercambiador de calor en el ciclo 1.

La trasferencia de calor al flujo de agua al flujo del refrigerante es proporcional a la fracción de vapor que se tenga en la corriente H1 y se genera mucho más trabajo sin embargo no podemos suministrarlo por completo debido a que se tiene el intercambiador de calor (antes del ciclo 2) y el otro ciclo.

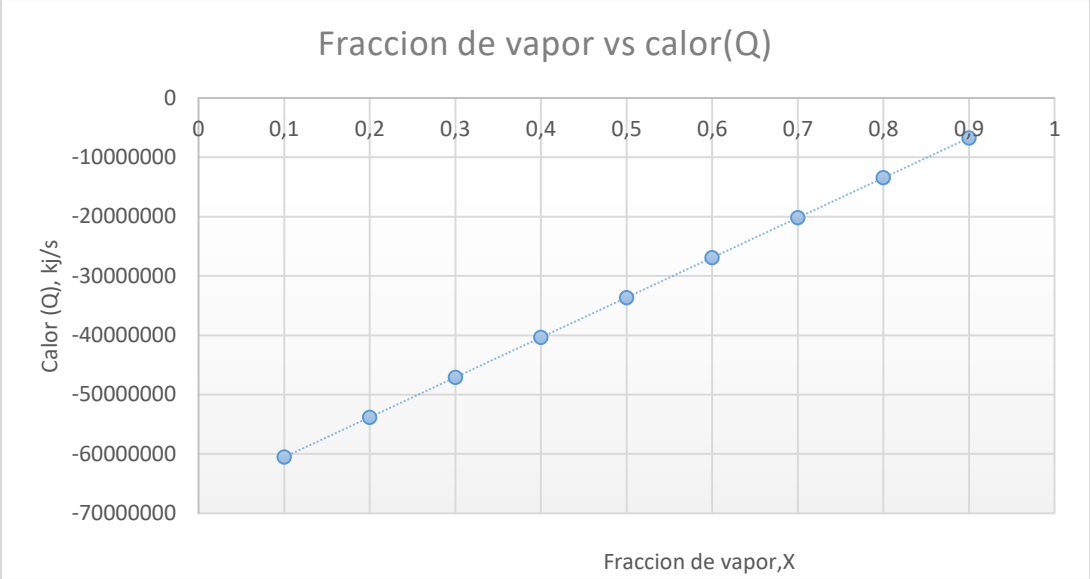

Fig. 18 Calor eliminado del intercambiador de calor en función de la fracción de vapor (antes del ciclo 2).

De la misma manera vemos en este intercambiador como varia linealmente con la fracción de vapor que se le suministre para el intercambio de calor y generar la energía requerida para la torre de absorción y la compresión del CO_2.

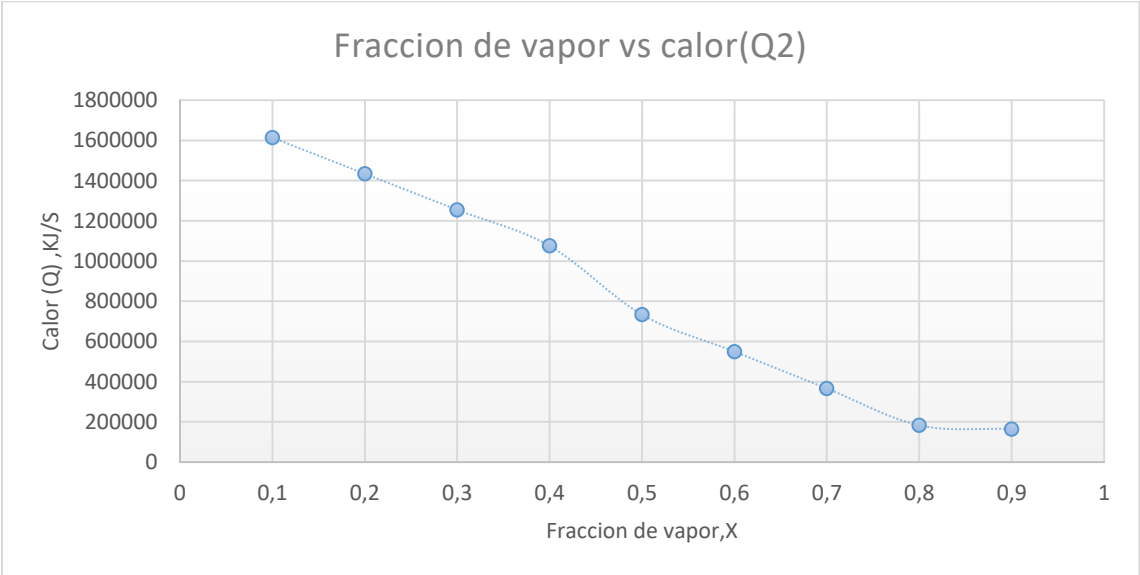

Fig. 19 Calor absorbido en el intercambiador de calor en función de la fracción de vapor en el ciclo 2.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Ya se han presentado los resultados en las tablas anteriores del esquema de integración energética basada en tres ciclos termodinámicos, el último ciclo en el cual nos enfocamos donde funciona con fluido de trabajo orgánico y trabaja con calor residual, en el ORC fue necesario remplazar un compresor por la bomba debido a las condiciones de temperatura y presión del fluido a la salida de la turbina ya que sale a muy altas temperaturas se requiere un condensador para enfriarlo a temperatura ambiental para que posteriormente bombearlo hacia el intercambiador de calor, debido a que las condiciones de salida en la turbina son condiciones de vapor sobrecalentado por lo que requiere mayor demanda de energía para enfriar la corriente por tal motivo se optó sustituir por un compresor, que por supuesto requiere mayor demanda de energía, pero en términos termodinámicos y haciendo un balance de energía es más viable utilizar un compresor.

A continuación de muestra el total de energía generada en cada una de las turbinas, primeramente, se muestra la turbina del ciclo Rankine termodinámico a baja presión (utiliza agua como fluido de trabajo), después están los ORC. También se muestra la potencia requerida por los compresores en ambos ciclos.

Tabla 6. Energía generada y requerida en las turbinas y compresores.

CICLO RANKINE CONVENCIONAL	
Energía generada por la turbina LPT (MWH)	10.468
CICLO 2 (ORC)	
Energía generada por la TURB2(MWH)	28.425
Energía requerida por el COMP2(MWH)	27.381 Diferencia 1.04 MWH
CICLO 1 (ORC)	
Energía generada por la TURB1(MWH)	22.434
Energía requerida por el COMP1(MWH)	19.269 Diferencia 3.17 MWH

Total 4.21 MWH

En general la generación de calor y trabajo están relacionados proporcionalmente con la concentración de vapor de agua y el flujo mientras aumenta hay más absorción de calor y eliminación de calor según sea el caso.

Conforme a los resultados obtenidos es posible llevar a cabo la integración energética como un proceso viable económicamente y ambientalmente ya que a pesar de la cantidad de energía requerida en ambos compresores se obtiene aun energía para la compresión de los gases residuales y aun se dispondría de energía según los resultados obtenidos en la siguiente tabla.

Tabla 7. Resultados de la potencia en cada ciclo y la neta generada.

Energía generada en la turbina del ciclo Rankine LPT (MWH)	10.468
Energía generada en el ciclo 1 (MWH)	28.425
Energía generada en el ciclo 2 (MWH)	22.434
Energía generada en los dos ORC (MWH)	4.2095
Energía neta generada en los tres ciclos(MWH)	14.678

En el ciclo 2 hay una diferencia considerable respecto al ciclo 1 debido a que en este se tiene un enfriador en el cual se retira calor equivalente a 140.816 MWH y hace que reduzca a tales valores la potencia generada. En el ciclo orgánico 1 y 2 se presentan la potencia neta restada la potencia que se necesitan en los compresores.

Tabla 8. Potencia neta de los tres ciclos termodinámicos de la planta.

Energía generada en el ciclo Brayton (MWH)	295.12
Energía generada en el ciclo Rankine convencional(MWH)	87.922
Energía en el ciclo Rankine orgánico (MWH)	4.209

Tabla 9. Resultados.

CO_2 capturado (kg/s)	31.962
Energía de compresión (MWH)	11.329
Energía neta de la planta (MWH)	370.660
GWP (g CO_2/kW-H)	199.218
GWP de la planta sin captura	417.402

En la Tabla 9 se tiene un panorama general de la planta con respecto a la energía generada y GPW comprados con el ciclo sin captura de CO2 se ve que se reduce hasta la mitad. Cuantitativamente hablando según se obtienen los resultados teóricos de los parámetros de la energía total generada y la contribución de los ciclos orgánicos a la planta en general.

Tabla 10. Factibilidad económica.

Precio por kW-h	**$ 1.5.00**	**Precio por energía neta generada**	**Precio por energía neta generada anual**
Potencia en la turbina LPT(kW-h)	10 469	15 702	$135 665 280
Potencia generada en el ORC(kW-h)	4 200	6 300	$54 432 000
Total	14 668	22002	$190 097 280

*Nota: se toman en cuenta 360 días/año.

En la Tabla 10 vemos el monto en pesos que se obtienen por la energía generada vendiéndola a la red de distribución. Esta energía comprende la turbina LPT y los sistemas ORC.

9. CONCLUSIONES

La configuración de integración energética presentada en este trabajo adicionando un ciclo Rankine orgánico y la captura de CO_2 dan resultados numéricos que hacen la propuesta atractiva ya que se está capturando hasta el 50 % deCO_2 que sin esta opción se estaría liberando a la atmosfera e incrementando el calentamiento global también permite la generación de energía eléctrica que hace que se compense parte de la energía total sacrificada del proceso ya que la eficiencia se reduce de un 10 hasta un 12 % .

Desde luego, lo anterior en un marco conceptual. Faltaría analizar el monto de la inversión para determinar la rentabilidad del proceso. Tomando en cuenta que una turbina o compresor de los MW citados tienen costos de adquisición altos.

10. REFERENCIAS

1. Arturo Jiménez Gutiérrez. Diseño de procesos en ingeniería química. Editorial Reverté 2003.

2. Bahaa Saleh, Gerald Koglbauer, Martin Wendland, Johann Fischer. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. Energy 32 (2007) 1210–1221.

3. Bertrand Fankam Tchanche, George Papadakis, Gregory Lambrinos, Antonios Frangoudakis.Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. Applied Thermal Engineering 29 (2009) 2468–2476.

4. Brígido J. Hipólito-Valencia, Eusiel Rubio-Castro b, José M. Ponce-Ortega, Medardo Serna-González Fabricio Nápoles-Rivera, Mahmoud M. El-Halwagi. Optimal integration of organic Rankine cycles with industrial processes. Energy Conversion and Management 73 (2013) 285ith.

5. Edward S. Rubin Anand B.Rao. A technical, Econiomic and Enviromental Assesment of Amine.based CO2 capture technology for Power Plant Greenhouse Gas Control. October 2002.

6. Fabricio Nápoles-Rivera, Medardo Serna-González, Abdullah Bin-Mahfouz,Arturo Jimenez-Gutierrez, Mahmoud M. El-Halwagi, Jose Maria Ponce-Ortega. Simultaneous optimization of energy management, biocide dosing and maintenance scheduling of thermally integrated facilities. Energy Conversion and Management 68 (2013) 177–192.

7. Fahad A. Al-Sulaimana, Ibrahim Dincerb, Feridun Hamdullahpur. Exergy analysis of an integrated solid oxide fuel cell and organic Rankine cycle for cooling, heating and power production. Journal of Power Sources 195 (2010) 2346–2354.

8. Gerardo Geovanni Esquivel-Patiño, Medardo Serna-González, Fabricio Nápoles-Rivera. Thermal integration of natural gas combined cycle power plants with CO_2 capture systems and organic Rankine cycles 151 (2017) 334–342,

9. J.M Smith, H.C Van Ness, M.M.Abbott Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química,2005.

10. Junjiang Bao, Li Zhao. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. Renewable and Sustainable Energy Reviews 24 (2013) 325–342.

11. Luis Fernando Lira-Barragan,Jose María Ponce-Ortega,Medardo Serna-Gonzalez,and Mahmoud M. El-Halwagi. Sustainable Integration of Trigeneration Systems with Heat Exchanger Networks. Published: January 16, 2014.Tzu-Chen Hung. Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids. Energy Conversion and Management 42 (2001) 539-553.

12. Umberto Desideri and Roberto Corbelli. CO_2 capture in small size cogeneration plants: technical and economical considerations. Energy Convers. Mgmt Vol. 39, No. 9, pp. 857-8671998 Elsevier Science Ltd.

13. Yiping Dai, Jiangfeng Wang, Lin Gao. Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery. Energy Conversion and Management 50 (2009) 576–582.

14. T. F. YEE and I. E. Grossmann. Simultaneous optimization models for heat integration-ii. heat exchanger network synthesis Compurers c&m. Engng, Vol. 14, No. 10, pp. 1165-1184.