

Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica por medio del Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) en un campo de gas natural del Piedemonte Llanero.

Edwin Gilberto Mendivelso Sánchez

Trabajo de Grado para Optar el título de Especialista en Ingeniería del Gas

Director

Luis Angel Holguin Galvis

Magister en Ingeniería de Petróleos y Gas

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Especialización en Ingeniería del Gas
Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por haberme concedido la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar con éxito esta etapa académica.

A mi familia, pilar fundamental en mi vida, por su apoyo incondicional, comprensión y constante motivación a lo largo de este proceso de formación profesional.

A los docentes y mentores de la especialización, cuya guía académica y experiencia profesional contribuyeron de manera significativa al desarrollo de este trabajo y a mi crecimiento en el campo de la Ingeniería del Gas.

Y, en general, a todas las personas e instituciones que directa o indirectamente hicieron posible la realización de este logro académico.

Tabla de Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. OBJETIVOS	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. MARCO REFERENCIAL	13
2.1 Antecedentes Investigativos.....	13
2.2 Marco Teórico-Conceptual	16
2.3 Marco legal.....	18
3. METODOLOGÍA	19
4. ANÁLISIS TÉCNICO-TEÓRICO DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE	21
4.1 Ciclo Orgánico de Rankine	21
4.1.1 Intercambiador de Calor.....	23
4.1.2 Turbina de Generación	24
4.1.3 Condensador.....	24
4.1.4 Bomba	25
4.2 Refrigerantes Orgánicos Hidrocarburos.....	26
4.2.1 Refrigerante R-170 (Etano).....	27
4.2.2 Refrigerante R-600 (Butano).....	27

4.2.3 Refrigerante R-290 (Propano).....	27
4.2.4 Refrigerante R-134A (1,1,1,2-Tetrafluoroetano)	28
4.2.5 Refrigerante R-152A (1,1-Difluoroetano)	28
4.2.6 Refrigerante R-22 (Hidroclorodifluorometano)	29
4.2.7 Refrigerante R-717 (Amoniac)	29
4.2.8 Refrigerante R-744 (Dióxido de Carbono)	30
5. PROCESO DE GENERACIÓN PARA UN CAMPO DE GAS	31
5.1 Generalidades del campo de gas de estudio	31
5.2 Bases de diseño	33
5.2.1 Criterios para intercambiadores de calor.....	33
5.2.2 Criterios para el condensador	33
5.2.3 Criterios para la turbina de generación	34
5.2.4 Criterios para bombas	34
5.2.5 Otros criterios generales.....	34
6. MODELO DE SIMULACIÓN CON REFRIGERANTES HIDROCARBUROS	35
6.1 Selección de corriente de proceso	35
6.2 Evaluación de refrigerantes	36
7. EVALUACIÓN DE CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN	39
9. CONCLUSIONES	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

Lista de Tablas

Tabla 1. Corrientes de proceso para la generación de energía	32
Tabla 2. Resultados evaluación de refrigerantes en ciclo ORC	36
Tabla 3. Recapitulación gas de proceso para ciclo ORC en campo de gas de estudio	39
Tabla 4. Resultados evaluacion de temperatura en aerofriador.....	40
Tabla 5. Resultados evaluación presión de descarga turbina.....	41
Tabla 6. Resultados evaluación presión descarga de bomba y flujo de refrigerante	42
Tabla 7. Dimensionamiento tuberías internas ciclo ORC	44

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema del Ciclo Orgánico de Rankine	16
Figura 2. Metodología proyecto de grado	19
Figura 3. Ciclo de Rankine convencional	21
Figura 4. Ciclo ORC modular	22
Figura 5. Esquemático de un Ciclo Orgánico de Rankine	23
Figura 6. Ubicación Piedemonte Llanero.....	31
Figura 7. Modelo de Ciclo ORC en Aspen Hysys	35
Figura 8. Diagrama T-H del refrigerante R-717	37
Figura 9. Propiedades críticas del R-744, tomado de la librería de Aspen Hysys	38
Figura 10. Esquema de proceso para evaluación de parámetros.....	40

Glosario

- ORC: Organic Rankine Cycle
- KW: Kilowatts
- MMSCFD: Millón de pies cúbicos de gas por día, a condiciones estándar
- BPD: Barriles por día
- SCH: Schedule
- GPSA: Gas Processors Suppliers Association

Resumen

Título: Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica por medio del Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) en un campo de gas natural del Piedemonte Llanero*

Autor: Edwin Gilberto Mendivelso Sánchez**

Palabras Clave: Ciclo Orgánico de Rankine, generación, gas de proceso, refrigerante, simulación

Descripción: Actualmente los procesos de obtención de energía eléctrica por medio de hidrocarburos están sufriendo una transformación debido a la tendencia hacia las energías renovables las cuales buscan reducir al máximo las emisiones de contaminantes al ambiente (CO₂ y CO) y mitigar problemas como los vistos hoy en día con el calentamiento global.

Debido a lo anterior, se han analizado diferentes tecnologías como los paneles solares, la geotermia y la energía eólica donde se requiere de grandes inversiones de capital. Teniendo en cuenta esto, en el presente trabajo de grado se realizó el diseño básico de un sistema de generación de energía eléctrica por medio del Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) empleando una corriente de gas de proceso de un campo del Piedemonte Llanero, analizando los diferentes refrigerantes comerciales y las variables operativas involucradas para encontrar aquellos parámetros que optimicen el proceso generando la máxima cantidad de electricidad.

Los refrigerantes evaluados fueron el R-170, R-600, R-290, R-134A, 5-152A, R-22, R-717 y el R-744 donde el refrigerante que mayor generación tuvo fue el R-717 debido a su amplio rango de operación que le permite mayor absorción de calor.

Las variables de operación se evaluaron donde los valores óptimos para el proceso son: una temperatura de descarga del aerofriador de 95 °F, presión de descarga de la turbina de 196 psig, presión de descarga de la bomba de 800 psig, flujo de refrigerante de 5840 BPD, MinApproach en el intercambiador de calor de 20 °F y una caída de presión en aerofriador de 15 psi.

Las variables evaluadas en el ciclo ORC permitieron una máxima generación de 795,7 KW brutos y 513,3 netos, donde adicionalmente se dimensionaron las tuberías internas del ciclo obteniendo para la fase líquida tubería ANSI 150 4 in-SCH 40 con una velocidad máxima de flujo de 6,7 ft/s y para la fase gas tubería ANSI 150 8 in-SCH 40 con una velocidad máxima de flujo de 56,7 ft/s.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Luis Angel Holguin Galvis. Magíster en Ingeniería de Petróleos y Gas.

Abstract

Title: Design of an electrical energy generation system using the Organic Rankine Cycle (ORC) in a natural gas field in Piedemonte Llanero*

Author: Edwin Gilberto Mendivelso Sánchez**

Key Words: Organic Rankine Cycle, generation, process gas, refrigerant, simulation

Description: Nowadays, the processes for obtaining electric energy through hydrocarbons are undergoing a transformation due to the trend towards renewable energies, which seek to reduce to a minimum the emissions of pollutants into the environment (CO₂ and CO) and mitigate problems such as those seen today with global warming.

Due to the above, different technologies have been analyzed such as solar panels, geothermal energy and wind energy where large capital investments are required. Taking this into account, in this degree work, the basic design of an electric energy generation system was carried out through the Organic Rankine Cycle (ORC) using a process gas stream from a field in Piedemonte Llanero, analyzing the different commercial refrigerants and the operating variables involved to find those parameters that optimize the process generating the maximum amount of electricity.

The refrigerants evaluated were R-170, R-600, R-290, R-134A, 5-152A, R-22, R-717 and R-744, where the refrigerant that generated the most heat was R-717 due to its wide operating range that allows it to absorb more heat.

The operating variables were analyzed and evaluated, where the optimal values for the process are: an air cooler discharge temperature of 95 °F, turbine discharge pressure of 196 psig, pump discharge pressure of 800 psig, coolant flow of 5840 BPD, MinApproach in the heat exchanger of 20 °F and a pressure drop in the air cooler of 15 psi.

The variables evaluated in the ORC cycle allowed a maximum energy generation of 795,7 KW gross and 513,3 KW net generated, where the internal pipes of the cycle were additionally sized, obtaining for the liquid phase ANSI 150 4 in-SCH 40 pipe with a maximum flow rate of 6,7 ft/s and for the gas phase ANSI 150 8 in-SCH 40 pipe was obtained with a maximum flow rate of 56,7 ft/s.

*Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Luis Angel Holguin Galvis. Master's in Petroleum & Gas Engineering.

INTRODUCCIÓN

Actualmente los procesos de obtención de energía eléctrica por medio de hidrocarburos están sufriendo una transformación debido a la tendencia hacia las energías renovables las cuales buscan reducir al máximo las emisiones de contaminantes al ambiente y mitigar los efectos que estos acarrearán.

En Colombia, en los últimos años se han estado realizando modificaciones a los procesos del gas natural para reducir las quemaduras en tea, los venteos y las emisiones de CO₂ con el fin de reducir el impacto ambiental, buscando a su vez nuevas tecnologías que permitan generar electricidad para continuar con las operaciones existentes.

Algunas alternativas de generación que se han estudiado involucran la energía eólica en la costa colombiana, los paneles solares en las instalaciones de los campos de producción de petróleo y gas y la geotermia aprovechando el calor proveniente del subsuelo.

Por otro lado, dentro de las operaciones de los campos de gas natural se encuentran diferentes corrientes de gas de proceso las cuales tienen como destino la reinyección para el aumento de la producción, la quema en tea o la quema para la operación de turbocompresores y turbogeneradores para la generación de electricidad.

Estos procesos de quema/combustión para la generación de energía eléctrica producen gases nocivos para el ambiente como el CO₂ y el CO que a largo plazo llevan a problemas como los vistos hoy en día con el calentamiento global, por lo que se han evaluado diferentes tecnologías

para la remoción de dichos gases por medio de nanomateriales, membranas, absorción y reacciones, pero no se ha pensado mucho en cambiar los métodos de generación aprovechando los recursos disponibles en las operaciones de hidrocarburos, sin la necesidad de una gran inversión como se requiere en sistemas eólicos, geotérmicos y solares.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo de grado se realiza el diseño básico de un sistema de generación de energía eléctrica por medio del Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) empleando una corriente de gas de proceso de un campo del Piedemonte Llanero con el fin de reducir el volumen de gas quemado en sistemas convencionales de generación y a su vez reducir las emisiones de gases nocivos para el ambiente.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de generación de energía eléctrica por medio del Ciclo Orgánico Rankine (ORC) en un campo de gas natural del Piedemonte Llanero.

1.2 Objetivos Específicos

- Analizar técnica y teóricamente el Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) como medio de generación de energía eléctrica basándose en información encontrada en literatura.
- Definir el proceso de generación de energía requerido a partir de una corriente de gas de proceso en un campo de gas natural del Piedemonte Llanero.
- Construir un modelo de simulación numérica del Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) para evaluar la capacidad de generación de diferentes refrigerantes hidrocarburos encontrados comercialmente.
- Evaluar las condiciones operativas del ciclo ORC para identificar las condiciones óptimas de proceso que permitan la mayor generación de energía.

2. MARCO REFERENCIAL

Dentro de los estudios que se han realizado con los ciclos ORC para la generación de energía se destaca fuertemente la geotermia al ser una gran fuente de calor, sin embargo, algunas investigaciones se han realizado en torno al sector Oil&Gas donde se estudia el análisis de diversos tipos de refrigerantes bajo las condiciones objetivo y el análisis de la eficiencia de estos ciclos orgánicos para implementación en sistemas operativos y optimizar los procesos.

2.1 Antecedentes Investigativos

En primer lugar, Rusev en su investigación de maestría estudió por medio de simulación, la generación de energía eléctrica empleando los gases a la salida de un motor de combustión de gas natural usando ciclos ORC en cascada encontrando una potencia, adicional a la del motor, de 2200 KW equivalentes a un aumento de eficiencia de 6,3% de generación y una potencia con un ciclo triple ORC de 2750 KW. Esto representa una mejora considerable al proceso de aprovechamiento de energía con una inversión económica fácilmente recuperable como lo manifiesta Rusev, después de calcular un tiempo de recuperación de la inversión de 2 años (Rusev, 2014).

Sánchez y Fiter en 2012 realizaron el análisis técnico-económico de la implementación de ciclos ORC modulares en algunas de las corrientes de salida de las destiladoras atmosféricas y de vacío de una refinería donde por medio de aerofriadores y turbinas de vapor se removió el calor de las corrientes de nafta, diésel ligero, diésel pesado y GasOil atmosférico (GAO) obteniendo una producción neta de 139 KW, 191 KW, 111 KW y 600 KW respectivamente. Esto

equivale a un ahorro de energía de 22,2 millones de KWh/año y reducción de 3812 TonCO₂/año (Sánchez & Fiter, 2012).

Como otro medio de optimización, pero con similares ideas de Sánchez y Fiter, el Laboratorio Nacional de Idaho y la empresa General Electric unieron esfuerzos para mejorar un ciclo ORC existente en un campo de producción de hidrocarburos; cambiando el intercambiador de calor tipo tubo-carcaza por uno de contacto. Esta alianza contrajo el diseño del nuevo equipo, la construcción del mismo y la puesta en marcha del ciclo con la optimización donde la eficiencia general del proceso aumentó entre el 20%-40% con un aumento de eficiencia del uso de la energía del combustible del 30%.

El costo de operación del ciclo se redujo un 15% y se estableció una nueva estrategia de comercialización de ciclos ORC para la industria empleando intercambiadores de contacto aportando un poco más a la mejora de los procesos para la reducción de impactos ambientales (Post Guillen Jalal Zia, 2013).

Ahora bien, empleando como fuente de calor el gas natural, Manrique en 2015 realizó un estudio para la generación de energía eléctrica empleando el ciclo ORC en 4 estaciones compresoras, que emplean turbocompresores y motores de combustión, del sistema nacional de gasoductos de Colombia con miras a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) encontrando una potencia eléctrica de hasta 123 GWh por año, equivalentes a una central generadora de 15 MW operando de forma continua todo el año; reduciendo a su vez hasta un 25% los GEI liberados al ambiente (Manrique, 2015).

Barbosa analizó teóricamente la eficiencia térmica y exergética de los ciclos ORC empleando 8 diferentes refrigerantes hidrocarburos e hidroclorofluorocarbonos encontrando eficiencias térmicas entre 12%-17% donde el n-hexano fue el refrigerante menos eficiente y los R-245FA y R-113 presentaron los mejores resultados siendo los más idóneos para emplearse en la producción de energía (Barbosa, 2018).

De manera similar a Barbosa, Ochoa et al realizaron un análisis exergético y económico de la implementación de un ciclo ORC acoplado a una turbina de gas natural operativa en un campo petrolero colombiano encontrando al intercambiador de calor como el elemento donde se presenta mayor destrucción de exergía, por lo que es el equipo que mayor pérdida de energía aprovechable tiene concluyendo que este es el punto más crítico de todo el proceso donde se debe tener mayor atención al momento de diseñarse procesos de generación con esta tecnología. Adicionalmente, se encontraron que los equipos de presión como la bomba y la turbina son los equipos de menor exergía destruida (menor pérdida de energía aprovechable) por lo que su operación es más flexible y se permite trabajar a la máxima eficiencia posible (Ochoa et al., 2020).

Finalmente, en el 2018 Barros et al verificaron la viabilidad técnica y económica de implementar un ciclo ORC para aumentar en 0,5 MW la generación de una turbina de gas natural ubicada en la costa colombiana donde se usaron referencias comerciales de equipos, encontrando baterías de ciclo ORC en paralelo para el requerimiento de generación. Este estudio empleó el fluido orgánico R245FA como refrigerante donde se obtuvo un aumento de ingresos de 0,068 USD/KW indicando una mejora al proceso con un tiempo de recuperación de la inversión de 7

años por lo que se concluyó una viabilidad positiva para la alternativa con aplicabilidad al sector en Colombia (Barros Zarante et al., 2018).

Con estos estudios se demuestra que la implementación de ciclos ORC en la industria Oil&Gas se ha analizado en cierta medida encontrando resultados bastante favorables permitiendo reducir el OPEX, optimizando los procesos y contribuyendo a reducir los impactos ambientales.

2.2 Marco Teórico-Conceptual

Ciclo Orgánico de Rankine

El ciclo orgánico de Rankine o comúnmente conocido como ORC (Organic Rankine Cycle) es un proceso termodinámico compuesto por un evaporador, una turbina, un condensador y una bomba los cuales en conjunto permiten extraer el calor de un combustible (sin quemarlo) y convertirlo en electricidad por medio de un generador (Cerrada & Villanueva, 2020).

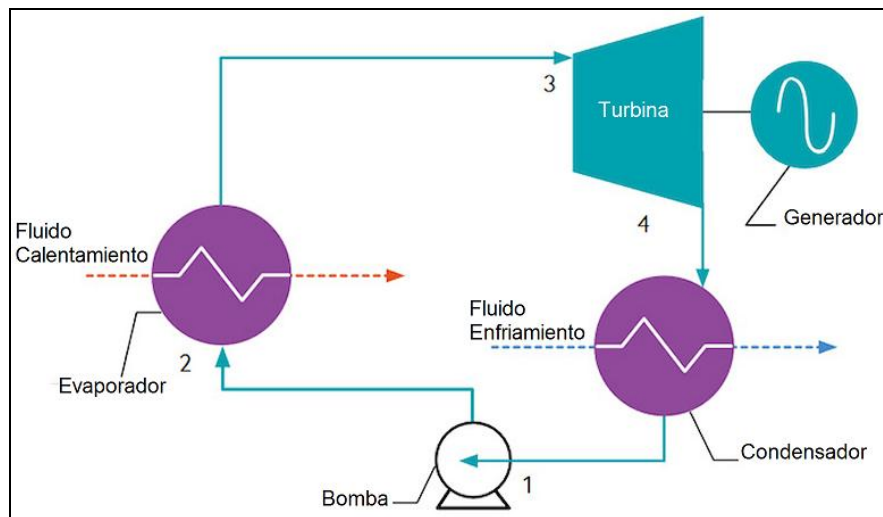


Figura 1. Esquema del Ciclo Orgánico de Rankine

Fuente. Adaptado de (International Association of Oil&Gas Producers, 2022)

Los ciclos ORC comúnmente emplean agua como medio de evaporación, pero se ha venido cambiando dicho fluido por refrigerantes orgánicos como el propano, el butano, el pentano y algunos hidrocarburos aromáticos (Chen et al., 2010) dado que poseen una temperatura de vaporización menor permitiendo un mayor flujo de calor que repercute en una mayor generación de energía (Eyidogan et al., 2016).

Gas de Proceso

Dentro de las plantas de tratamiento, procesamiento y licuefacción de gas natural hay múltiples corrientes las cuales llevan el hidrocarburo a un punto o equipo de venta (fuera de la planta) que se denomina gas de venta, el cual debe tener los parámetros de calidad establecidos por la CREG en cuanto a su contenido de H₂S, CO₂ y humedad³.

Por otro lado, todas aquellas corrientes las cuales llegan a un equipo dentro de una misma planta o unidad y no salen; se les denomina gas de proceso porque es usado como base para otros procesos. Dentro de estas se encuentran los gases de tea, gases de inyección, fuel gas, etc.

Refrigerante Hidrocarburo

Dentro de los múltiples refrigerantes orgánicos existentes, se encuentra un grupo que está constituido únicamente por átomos de hidrógeno (H₂) y carbono (C) que poseen debido a su estructura molecular una baja temperatura de vaporización; estos compuestos hidrógeno-carbono se conocen como refrigerantes hidrocarburo los cuales resaltan por tener una alta capacidad de almacenar y liberar calor, siendo los más usados industrialmente el propano y el butano con 42,1

³ Webgrafía: <https://cutt.ly/vA80ho0>

°C y 0,90 °C de temperatura de vaporización respectivamente (Andrea Crincoli Rondón & Álvarez Brito, 2022.; Chen et al., 2010).

2.3 Marco legal

Debido a la exigencia gubernamental de reducir al mínimo el consumo de gas natural en operaciones de producción y/o explotación de hidrocarburos se debe tener en cuenta la resolución 40317 de 2023 del Ministerio de Minas y Energía en la cual se limitan los consumos de gas empleado en actividades como quemas en tea, venteo intencionado o accidental y combustión.

3. METODOLOGÍA

La metodología seguida para la ejecución del proyecto de grado se basó en 4 etapas correspondientes a los 4 objetivos planteados.



Figura 2. Metodología proyecto de grado

- **Análisis técnico basado en literatura**

Esta primera etapa consiste en la búsqueda de información bibliográfica proveniente de fuentes confiables, que permitan realizar un análisis teórico y técnico de las diferentes operaciones unitarias involucradas en el ciclo orgánico de Rankine para la generación de energía, además de los diferentes refrigerantes comerciales que se emplean en la industria Oil&Gas.

- **Definición proceso de generación-Campo Estudio**

En esta etapa se definen las condiciones generales del campo de gas de estudio, además de las posibles corrientes de gas de proceso que se podrían emplear en el ciclo ORC para la generación de energía.

Se especifican también, las bases y criterios de diseño que se deben tener en cuenta para el ciclo de generación en el contexto del campo de estudio.

- **Construcción de modelo de simulación**

En este punto se da lugar a la construcción de una simulación numérica del ciclo orgánico de Rankine empleando el software Aspen Hysys para seleccionar la corriente de gas de proceso del campo estudio que permita la mayor generación de energía. Adicionalmente, se realiza la evaluación de los diferentes refrigerantes para identificar la mejor alternativa a emplearse para el caso particular.

- **Evaluación de condiciones de operación**

La última etapa consiste en la recopilación de la mejor corriente de gas de proceso y el mejor refrigerante para una posterior evaluación de las diferentes variables de proceso que se pueden ajustar en el ciclo de generación con el fin de maximizar la energía producida y definir los valores óptimos que permiten dicha generación.

4. ANÁLISIS TÉCNICO-TEÓRICO DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE

Para poder cumplir con los objetivos trazados en el presente trabajo de grado, en primer lugar, se debe entender el proceso que se va a diseñar basándose en información bibliográfica, analizando el funcionamiento de los equipos involucrados y las principales variables operativas asociadas.

4.1 Ciclo Orgánico de Rankine

El Ciclo Orgánico de Rankine u “ORC” por sus siglas en inglés (Organic Rankine Cycle) es un proceso cíclico termodinámico de Rankine el cual ha sido modificado debido a las propiedades termodinámicas del refrigerante (Colonna et al., 2015; Quoilin, 2008).

En un ciclo de generación Rankine convencional el fluido de refrigeración es el agua el cual recibe calor de una fuente caliente y genera trabajo mecánico, pero dadas las propiedades del agua se tienen límites de operación a 0 °C y dificultad por encima de los 100 °C imponiendo restricciones operativas para temperaturas medias o incluso bajas debido al equilibrio térmico.

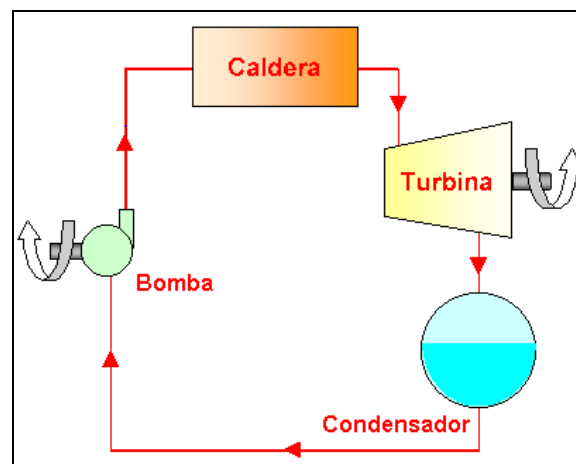


Figura 3. Ciclo de Rankine convencional

Fuente. Adaptado del libro “Termodinámica” de Yunus Cengel y Michael Boles

El ciclo orgánico toma los mismos equipos presentados en la figura anterior, modificando la caldera por un intercambiador de calor para aumentar la eficiencia del ciclo y modifica el agua de refrigeración por un fluido orgánico caracterizado por tener un mayor peso molecular otorgándole mejores propiedades como un menor punto de condensación y un menor punto de ebullición (International Association of Oil&Gas Producers, 2022). El ciclo ORC a su vez es muy versátil debido a la variedad de fuentes orgánicas que convierten el calor en energía eléctrica permitiendo emplearse en gran cantidad de operaciones industriales.

Otras características las cuales han generado atractivo en el ciclo ORC son su bajo costo operativo, disponibilidad comercial, menor costo de mantenimiento y su modularidad dado a la simpleza del proceso; es común operarse este proceso en un empaquetado de tamaño reducido con la modalidad Plug&Play (Tchanche et al., 2013).



Figura 4. Ciclo ORC modular

Fuente: Tomado de Rank. Disponible en <https://www.rank-orc.com/es/rank-htc/>

El proceso de generación por medio un refrigerante orgánico (ORC) es simple como se explicó previamente, pero requiere de una profundización en cada uno de sus componentes para identificar las variables, parámetros y funciones técnicas que permitan operar óptimamente el sistema.

4.1.1 Intercambiador de Calor

El intercambio de calor es una de las principales operaciones dentro del ciclo orgánico de Rankine dado que en este aumenta su temperatura el refrigerante orgánico para pasar a la turbina y generar la electricidad. Dicho intercambio energético ocurre entre una fuente de alta energía y el refrigerante; donde puede suceder en un intercambiador de tubos y carcaza convencional como se presenta en la siguiente figura o puede involucrar trenes de precalentamiento y sobrecalentamiento dependiendo de los requerimientos de la generación.

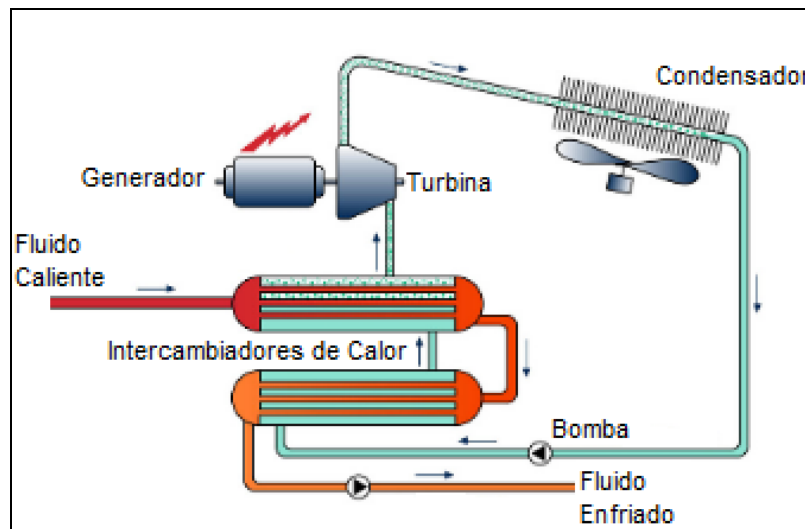


Figura 5. Esquemático de un Ciclo Orgánico de Rankine

Fuente. Adaptado de ORMAT Technologies. Disponible en <https://www.ormat.com/en/company/news/view/?ContentID=8819>

En este equipo de calor se consideran pérdidas de presión muy bajas (5-10 psi) y se requiere de un control de temperatura muy eficiente para asegurar la mayor evaporación posible del refrigerante, aumentando la generación.

El punto pinch y el *minimum approach* de temperatura son variables de gran valor para este tipo de equipos donde en ciclos ORC se ha encontrado que con un *minimum approach* entre

10°C y 15°C se obtiene la mayor eficiencia general del ciclo (Andreasen et al., 2015). Adicionalmente, se tienen en cuenta otros parámetros de operación y diseño como el cruce de temperaturas y la adecuada selección de la temperatura de salida de la corriente de refrigerante (Quoilin, 2008).

4.1.2 Turbina de Generación

Consiste en una turbina de gas la cual genera una expansión en el refrigerante, conectada a un generador eléctrico para que ocurra la producción de electricidad. El proceso de expansión es el centro del ciclo ORC y es de principal cuidado el diseño mecánico que se realice.

Operativamente la turbina de gas emplea presiones de descarga determinadas por el condensador dado el cruce de temperaturas en este, pero es común buscar el mayor diferencial de presión en este equipo para maximizar la eficiencia del proceso. La caída de presión generada es singular para cada proceso dependiendo del refrigerante orgánico empleado por lo que requiere de atención especial para evitar un gasto innecesario de energía (Carcasci & Winchler, 2016; Hijriawan et al., 2022).

4.1.3 Condensador

Esta operación unitaria es bastante versátil en ciclos ORC debido que depende de las condiciones ambiente donde ocurra la operación.

Este proceso es una condensación del gas descargado de la turbina de generación donde se busca llegar hasta la fase líquida en su totalidad empleando un medio de refrigeración externo el cual puede ser aire ambiente, refrigerante, agua de enfriamiento o incluso una corriente de proceso fría la cual capture calor.

El criterio de selección para el medio de enfriamiento (aire, agua, etc) depende del entorno donde se ubique el ciclo ORC, dado que en climas cálidos la eficiencia con un aroenfriador es demasiado baja mientras en climas helados se obtienen excelentes resultados. Adicionalmente, la facilidad de tener fluidos enfriadores como el agua o freones auxiliares ayuda a la selección.

Por otro lado, el *minimum approach* de temperatura es relevante para estos equipos de condensación ya que delimita la temperatura de salida del refrigerante orgánico y por ende la presión de descarga del mismo. Al considerar una presión de descarga y una pérdida menor a 15 psi se genera una estimación de la presión de entrada al equipo, la misma presión de descarga de la turbina de generación (Andreasen et al., 2015), permitiendo conocer cuánto es la caída de presión en la expansión.

4.1.4 Bomba

Es el proceso final del ciclo y el de mayor consumo energético debido al trabajo requerido para su funcionamiento, donde la bomba mantiene la presión de operación de todo el ciclo asegurando la eficiencia del proceso y permitiendo la generación.

El diseño de la bomba es relativamente sencillo donde se busca reducir el consumo de energía para maximizar la generación neta (energía entregada para uso).

4.2 Refrigerantes Orgánicos Hidrocarburos

La selección de un refrigerante para el proceso de generación depende en gran medida de la naturaleza de la fuente de calor, el costo de la operación, la disponibilidad comercial y las facilidades para manipular las propiedades del fluido (Rettig et al., 2011). Dentro de estas propiedades se destacan (Quoilin et al., 2013):

- Curva de saturación
- Curva de entropía
- Punto de fusión
- Punto de ebullición
- Calor de vaporización
- Impacto y seguridad ambiental
- Viscosidad, para los líquidos
- Estabilidad térmica

Dentro de los refrigerantes orgánicos hidrocarburos hay gran variedad de fluidos que se emplean industrialmente, que son de fácil consecución comercial o incluso desarrollados y patentados para mejorar la eficiencia del proceso o aumentar las posibilidades de aplicación.

4.2.1 Refrigerante R-170 (Etano)

El R-170 es un gas compuesto por etano (C_2) el cual tiene múltiples usos industriales dado a sus bajas temperaturas de operación; inferiores a los $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Algunas de sus propiedades termodinámicas son (GasesGrit, 2020; Prado, 2023):

- Temperatura de ebullición: $-88,6\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de congelamiento: $-172\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Calor de vaporización: 354 KJ/Kg
- Densidad: $0,28\text{ Kg/L}$

4.2.2 Refrigerante R-600 (Butano)

El R-600 es un gas compuesto por butano (C_4), considerado como un refrigerante natural el cual se emplea para refrigeración de equipos o como GLP. Posee temperaturas de operación mayores a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por lo que posee una menor capacidad de captación de calor que el R-170. Algunas de sus propiedades termodinámicas son (GasesGrit, 2020):

- Temperatura de ebullición: $-11,7\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Calor de vaporización: 332 KJ/Kg
- Densidad: $0,56\text{ Kg/L}$

4.2.3 Refrigerante R-290 (Propano)

El R-290 es un gas compuesto por propano (C_3) empleado para refrigeración de fluidos a altas temperaturas dado su bajo punto de ebullición. También se emplea en conservación de sustancias

de laboratorio o para ensayos. Algunas de sus propiedades termodinámicas son (GasesGrit, 2020):

- Temperatura de ebullición: $-42,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Calor de vaporización: 342 KJ/Kg
- Densidad: $0,48\text{ Kg/L}$

4.2.4 Refrigerante R-134A (1,1,1,2-Tetrafluoroetano)

El R-134A es un refrigerante hidrofluorocarbonado; una variación de los refrigerantes hidrocarburos convencionales con mejores propiedades fisicoquímicas gracias a la adición del halógeno (flúor). Su fórmula química es CH_2FCF_3 y se caracteriza por emplearse en medias o altas temperaturas permitiendo un intercambio de calor mayor. Algunas de sus propiedades termodinámicas son (Gasservei, 2020; Prado, 2023):

- Temperatura de ebullición: $-26,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de congelamiento: $-103\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Calor de vaporización: 217 KJ/Kg
- Densidad: $1,21\text{ Kg/L}$

4.2.5 Refrigerante R-152A (1,1-Difluoroetano)

Este refrigerante es un sustituto del R-134A con un menor factor contaminante por lo que es más usado en procesos de refrigeración. Su fórmula química es $\text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$ y se caracteriza por tener un salto entálpico que le proporciona mayor capacidad calórica y se emplea en medias o altas temperaturas. Algunas de sus propiedades termodinámicas son (GasesGrit, 2020):

- Temperatura de ebullición: $-24,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de congelamiento: $-117\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Calor de vaporización: 307 KJ/Kg
- Densidad: $0,90\text{ Kg/L}$

4.2.6 Refrigerante R-22 (Hidroclorodifluorometano)

El R-22 es un refrigerante hidroclorofluorocarbonado con una elevada capacidad calorífica de vaporización por lo que es un excelente captador de calor, con un amplio rango de operación, pero con restricciones de comercialización y uso debido a un alto factor contaminante. Se emplea en algunos ciclos de refrigeración con licencias ambientales específicas. Su fórmula química es CHClF_2 y algunas de sus propiedades termodinámicas son (Prado, 2023):

- Temperatura de ebullición: $-29,8\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de congelamiento: $-158\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Calor de vaporización: 217 KJ/Kg
- Densidad: $1,17\text{ Kg/L}$

4.2.7 Refrigerante R-717 (Amoniac)

El R-717 es un gas compuesto por amoniac (NH_3) y metano, considerado como un refrigerante natural el cual se emplea en chillers, plantas refrigeradoras o condensadores de gran volumen. Debido a sus características fisicoquímicas se emplea en bajas y medias temperaturas alcanzando hasta $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Algunas de sus propiedades termodinámicas son (Prado, 2023):

- Temperatura de ebullición: $-33,3\text{ }^{\circ}\text{C}$

- Temperatura de congelamiento: $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Calor de vaporización: 1313 KJ/Kg
- Densidad: $0,59\text{ Kg/L}$

4.2.8 Refrigerante R-744 (Dióxido de Carbono)

Es el refrigerante comercial de menor impacto ambiental con un muy amplio rango de operación para la captación de calor y un menor costo; se emplea en refrigeración de equipos de proceso y bombas de calor, pero requiere de elevados volúmenes de trabajo por lo que puede acarrear equipos de mayor tamaño elevando los costos de inversión. Algunas de sus propiedades termodinámicas son (Linde, 2020):

- Temperatura de ebullición: $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Calor de vaporización: 132 KJ/Kg
- Densidad: $1,52\text{ Kg/L}$

5. PROCESO DE GENERACIÓN PARA UN CAMPO DE GAS

5.1 Generalidades del campo de gas de estudio

La obtención de energía eléctrica es un tema que preocupa a todos los campos de producción del área llanera, donde en específico para un campo de gas natural se han llegado a presentar problemáticas operativas las cuales ponen en riesgo la explotación por bajas en el tendido eléctrico. Ante la anterior situación, se han adoptado diversas tecnologías de generación como lo son los turbogeneradores y plantas termoeléctricas donde se obtiene el fin deseado, pero se liberan gran cantidad de gases de combustión al ambiente.



Figura 6. Ubicación Piedemonte Llanero

El campo de gas de estudio se caracteriza por tener una producción rica en metano (aproximadamente 80%) con un 10% de etano, además de poca presencia de GLP y pentanos, otorgándole un buen poder calorífico aprovechable. Dentro de esta operación de explotación se cuenta con procesos de separación, tratamiento de gas y reinyección donde se busca mantener la

rentabilidad de la operación y cumplir con los estándares requeridos para el transporte y posterior venta de gas al mercado colombiano.

El proceso de generación por medio del ciclo ORC requiere, como se mencionó anteriormente, de una corriente de alta energía la cual entregue su calor a un refrigerante, por lo que se realizó el análisis de corrientes de proceso con alta temperatura y alto flujo en el campo de gas de estudio para el diseño de la generación. A continuación, se presentan 8 corrientes de proceso dentro del campo de gas las cuales pueden ser viables en el ciclo ORC, teniendo en cuenta que estas corrientes no sean del gas que ya se emplea para generación, gas de transporte para venta, gas donde la reducción de la temperatura afecte procesos aguas abajo (compresores, filtros, etc) o donde se esté propensa la formación de hidratos.

Tabla 1.

Corrientes de proceso para la generación de energía

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8
Presión [psig]	1800	1807	5200	4500	490	489	5000	260
Temperatura [F]	140	140	245	139,7	114	127	259,2	115
Flujo [MMSCFD]	69,79	64	335,4	5581 BPD	12,9	363,9	20	5,6
N ₂	0,00519	0,00514	0,00575	0,00000	0,00038	0,00437	0,00322	0,00426
CO ₂	0,03504	0,03513	0,03602	0,00000	0,03331	0,04592	0,04291	0,14477
H ₂ S	0,00001	0,00001	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Methane	0,80103	0,79203	0,79989	0,00000	0,24144	0,70224	0,64799	0,77369
Ethane	0,08516	0,09071	0,08824	0,00000	0,35793	0,12493	0,16838	0,05722
Propane	0,03734	0,04201	0,03668	0,00000	0,32238	0,07164	0,09436	0,01382
i-Butane	0,00919	0,01015	0,00867	0,00000	0,01837	0,01442	0,0157	0,00241
n-Butane	0,01088	0,012	0,0105	0,00000	0,01335	0,01651	0,01643	0,00243
i-Pentane	0,00479	0,00475	0,00394	0,00000	0,00756	0,00817	0,00643	0,00078
n-Pentane	0,0029	0,00272	0,00253	0,00000	0,00211	0,00409	0,00301	0,00041
n-Hexane	0,0024	0,00163	0,00541	0,00000	0,00005	0,001	0,0006	0,00007
n-Heptane	0,002	0,00101	0,00002	0,00000	0,00000	0,00004	0,00002	0,00002
n-Octane	0,0016	0,00066	0,00001	0,00000	0,00000	0,00002	0,00001	0,00001
n-Nonane	0,0006	0,00033	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00002
n-Decane	0,0002	0,00009	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00002
C11+	0,00009	0,00004	0,00161	0,00000	0,00010	0,00193	0,00091	0,00003
H ₂ O	0,00158	0,00158	0,00073	1,00000	0,00302	0,00472	0,00003	0,00004

5.2 Bases de diseño

Los criterios y premisas utilizados para la evaluación y toma de decisiones para el desarrollo del diseño del sistema de generación en el campo de gas son fundamentales para establecer los límites que se deben tener, donde no solo se analizan las condiciones del proceso sino las implicaciones termodinámicas en los equipos buscando mantener la seguridad de las personas, de los procesos y del ambiente.

5.2.1 Criterios para intercambiadores de calor

- Al trabajarse con intercambiadores convencionales de tubos y carcasa se considera un Minimum Approach (MinApproach) de 18-27 °F y en el caso de rehervidores o equipos para cambio de fase se considera un MinApproach de 9-20 °F.
- Se considera fase vapor en el refrigerante a la salida del intercambiador gas/refrigerante.
- El cruce de temperaturas es un fenómeno el cual se debe tener en cuenta en simulaciones de proceso y evitarse dado que viola los principios termodinámicos de la transferencia de calor.

5.2.2 Criterios para el condensador

Dada las condiciones de operación del campo no se cuenta con un recurso hídrico para agua de enfriamiento por lo que se opta en emplearse un aerofriador en lugar de un condensador donde el flujo de aire se toma a condiciones ambiente (86 °F@0 psig).

5.2.3 Criterios para la turbina de generación

- La generación se da por medio de una turbina de gas teniendo en cuenta la fase saliente del intercambiador gas/refrigerante, esto con aras a aumentar la potencia entregada.
- Se considera una eficiencia isentrópica del 75%.

5.2.4 Criterios para bombas

- Se considera una eficiencia del 75% con un flujo totalmente líquido.

5.2.5 Otros criterios generales

- No puede ocurrir generación hidratos ni condensados en la corriente de gas de proceso a la salida del intercambiador gas/refrigerante.
- De acuerdo con la GPSA, para líneas de gas se tiene una velocidad máxima de flujo de 80 ft/s con el fin de evitar la vibración de las tuberías y posibles fallos en la integridad.
- De acuerdo con la GPSA, para líneas de líquido se tiene una velocidad máxima de flujo de 15 ft/s con el fin de evitar fallos en la integridad de la tubería.

6. MODELO DE SIMULACIÓN CON REFRIGERANTES HIDROCARBUROS

El modelo de simulación numérica se realizó en el software Aspen Hysys donde en primer lugar se construyó un ciclo ORC compuesto por un intercambiador de calor, una turbina, un aereoenfriador y una bomba, siguiendo el paquete termodinámico Peng-Robinson.

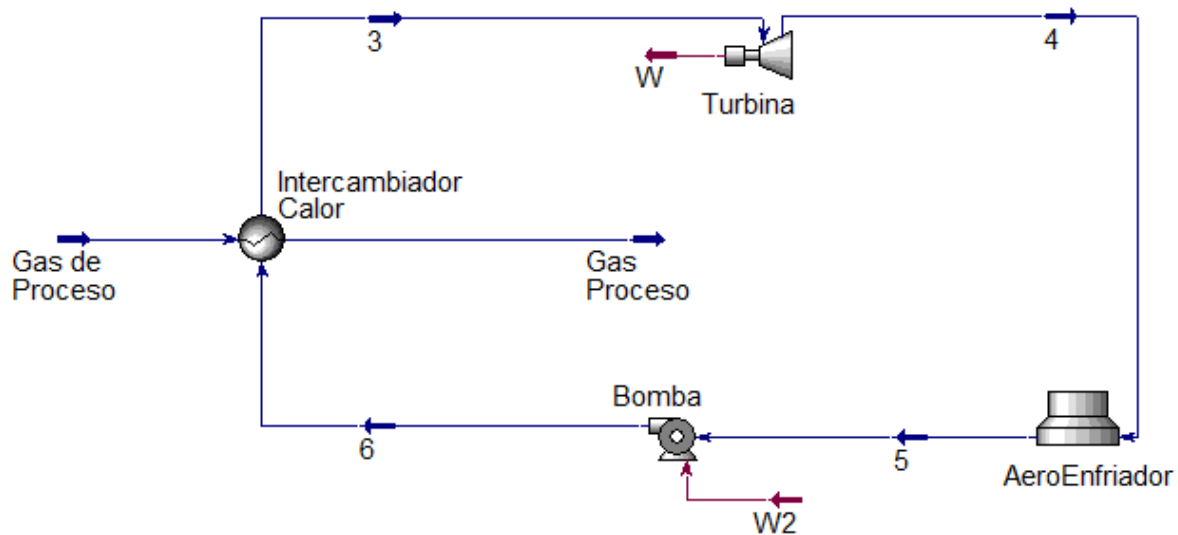


Figura 7. Modelo de Ciclo ORC en Aspen Hysys

6.1 Selección de corriente de proceso

Una vez construido el ciclo de generación se estableció un flujo base de refrigerante de 400 BPD, los cuales circulan por las corrientes 3, 4, 5 y 6. Adicionalmente una condensación completa de refrigerante en la corriente 5 y una evaporación completa en la corriente 3; todo esto con el fin de poder establecer una comparación entre las diferentes corrientes de gas de proceso de la Tabla 1 y definir aquella que permita la mayor generación.

Para las 8 corrientes simuladas, 5 tuvieron cruce de temperaturas en el intercambiador de calor violando los principios de la transferencia de calor por lo que se recurrió a modificar las

condiciones de simulación a diferentes flujos, presiones y temperaturas donde en ningún caso se logró una convergencia exitosa por lo que las corrientes de gas de proceso no le transfieren la suficiente cantidad de energía al refrigerante para generar 1 KW; descartando dichas líneas.

Por otro lado, las corrientes de gas de procesos 3, 4 y 7 tuvieron una convergencia exitosa alcanzando una generación cercana a los 60 KW, pero la corriente 4 al operar con vapor y menor flujo no transfirió tanta energía reduciendo la eficiencia general del ciclo por lo que la descarta.

Finalmente, teniendo en cuenta que el flujo de la corriente 3 es mucho mayor se optó por esta línea como la mejor para la implementación del ciclo ORC ya que permite el mayor paso de calor al refrigerante, aumentando la eficiencia del proceso.

6.2 Evaluación de refrigerantes

Teniendo en cuenta las condiciones del gas de proceso de 5200 psig, 245 °F y 335,4 MMSCFD se realizó la evaluación de la capacidad de generación de diferentes refrigerantes comerciales tomando como base un flujo de 400 BPD con los criterios de diseño establecidos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 2.

Resultados evaluación de refrigerantes en ciclo ORC

REFRIGERANTE	GENERACIÓN [KW]	CONSUMO [KW]	NETO [KW]
R-290	14,295	3,468	10,826
R-134A	7,916	1,407	6,509
R-152A	14,114	2,173	11,941

REFRIGERANTE	GENERACIÓN [KW]	CONSUMO [KW]	NETO [KW]
R-22	7,315	1,634	5,681
R-717	54,282	3,826	50,456
R-744	No hay convergencia		
R-600	28,446	3,428	25,017
R-170	2,568	2,134	0,434

Como se evidencia en la tabla anterior, el refrigerante R-717 presenta la mayor generación neta con 50,4 KW, siendo muy superior a los demás resultados obtenidos por lo que se definió como el mejor refrigerante a emplearse para el proceso ORC con la corriente de gas de proceso.

La diferencia encontrada en el R-717 radica en el amplio rango de operación que posee el refrigerante ya que, como se observa en la gráfica siguiente, la temperatura varía desde los $-50\text{ }^{\circ}\text{F}$ hasta los $270\text{ }^{\circ}\text{F}$ por lo que acepta mayor flujo de calor, permitiendo mayor generación.

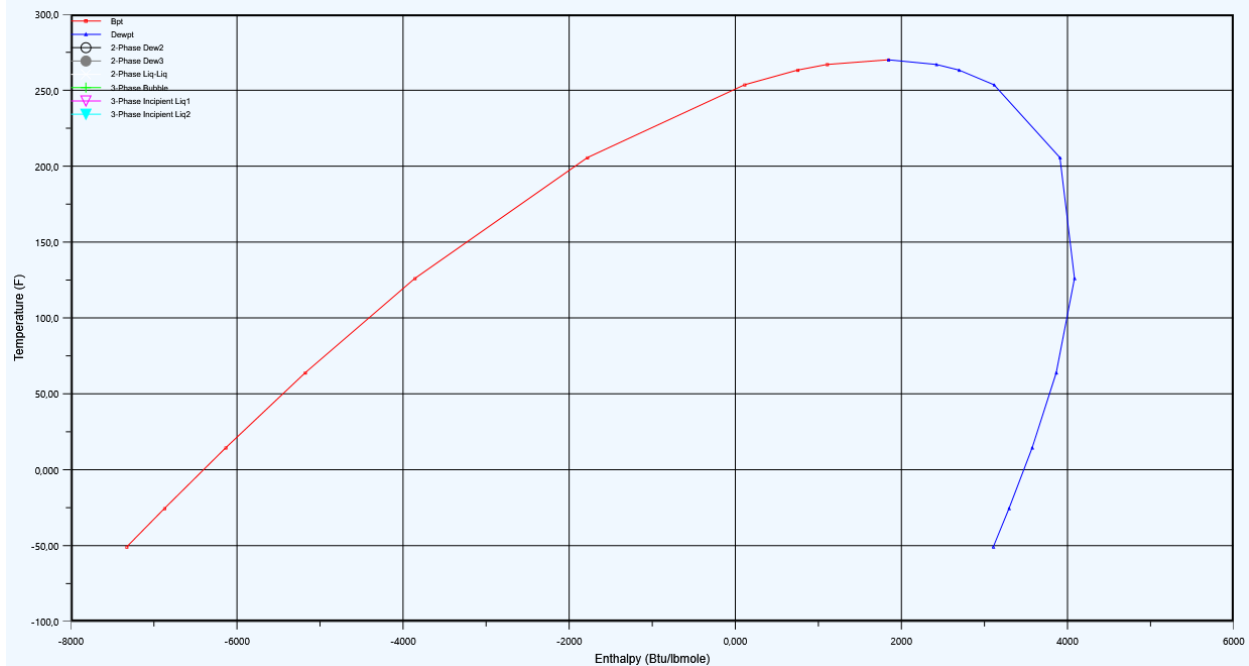
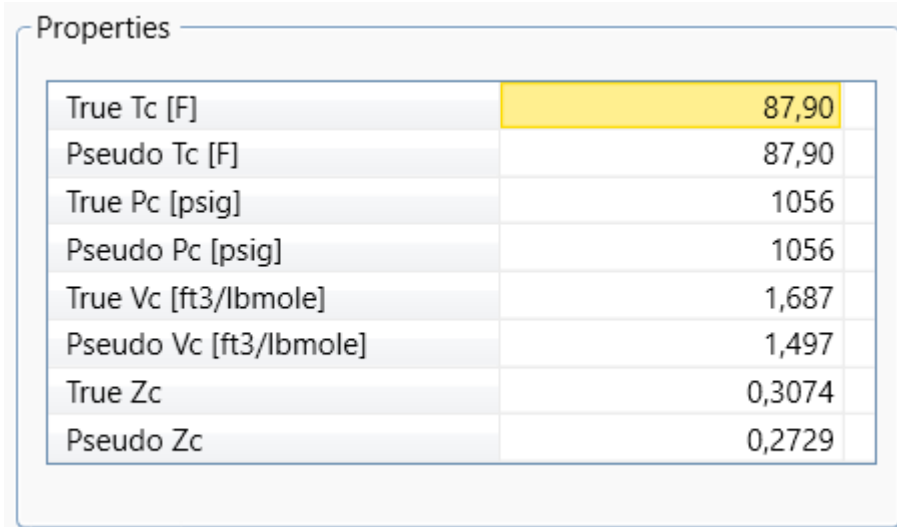


Figura 8. Diagrama T-H del refrigerante R-717

En el caso del refrigerante R-744, no se alcanza una convergencia para el modelo de simulación dado que la temperatura ambiente definida para el aerofriador es de 86 °F (criterio de diseño) y para que no haya cruce de temperaturas, la temperatura de salida del refrigerante debe ser mayor a 87 °F que es operativamente imposible dado que la temperatura crítica del R-744 es 87,9 °F.



The image shows a screenshot of the 'Properties' window in Aspen Hysys. The window title is 'Properties'. It contains a table with two columns: the property name and its value. The first row, 'True Tc [F]', is highlighted in yellow and has a value of 87,90. The other rows are: 'Pseudo Tc [F]' (87,90), 'True Pc [psig]' (1056), 'Pseudo Pc [psig]' (1056), 'True Vc [ft3/lbmole]' (1,687), 'Pseudo Vc [ft3/lbmole]' (1,497), 'True Zc' (0,3074), and 'Pseudo Zc' (0,2729).

Property	Value
True Tc [F]	87,90
Pseudo Tc [F]	87,90
True Pc [psig]	1056
Pseudo Pc [psig]	1056
True Vc [ft3/lbmole]	1,687
Pseudo Vc [ft3/lbmole]	1,497
True Zc	0,3074
Pseudo Zc	0,2729

Figura 9. Propiedades críticas del R-744, tomado de la librería de Aspen Hysys

7. EVALUACIÓN DE CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN

Una vez definida la mejor alternativa de corriente de gas de proceso donde realizarse el ciclo ORC en el campo de gas de estudio, además del refrigerante que permite la mayor generación de energía (R-717), se realizó la evaluación de las condiciones óptimas de generación que permitan obtener la mayor generación neta posible. A continuación, se presenta una recapitulación de las condiciones de gas de proceso seleccionadas para la evaluación hecha.

Tabla 3.

Recapitulación gas de proceso para ciclo ORC en campo de gas de estudio

Gas de Proceso	
Presión [psig]	5200
Temperatura [F]	245
Flujo [MMSCFD]	335,4
N₂	0,00575
CO₂	0,03602
H₂S	0,00000
Methane	0,79989
Ethane	0,08824
Propane	0,03668
i-Butane	0,00867
n-Butane	0,0105
i-Pentane	0,00394
n-Pentane	0,00253
n-Hexane	0,00541
n-Heptane	0,00002
n-Octane	0,00001
n-Nonane	0,00000
n-Decane	0,00000
C₁₁₊	0,00161
H₂O	0,00073

Para la evaluación de las condiciones de operación se analizaron las variables sensibles en el proceso, las cuales puedan aumentar la generación donde se destaca la presión de descarga de la bomba, la temperatura del refrigerante a la salida del aerofriador, el flujo de refrigerante y la presión de descarga de la turbina. Estas variables fueron estudiadas donde se tuvo en cuenta que no se genere cruce de temperaturas en el intercambiador de calor o en el aerofriador y se tomó como referencia el siguiente esquema del proceso.

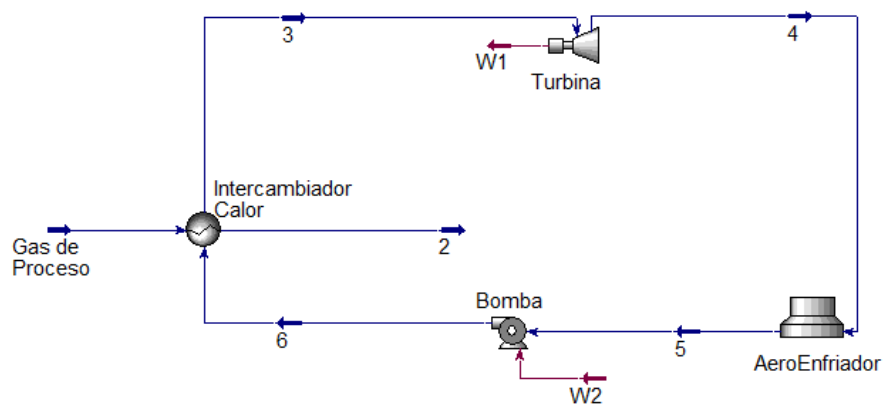


Figura 10. Esquema de proceso para evaluación de parámetros

Inicialmente se evaluó la temperatura de descarga del refrigerante en el aerofriador (corriente 5) desde un valor de 87 °F evitando el curce de temperaturas y a continuación se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4.

Resultados evaluación de temperatura en aerofriador

Temperatura en 5 [°F]	Presión en 4 [psig]	Generación turbina [KW]	Consumo bomba [KW]	Generación Neta [KW]	Temperatura en 2 [°F]	Temperatura en 3 [°F]
87	166,842	69,279	7,994	61,285	250,960	246,489
89	172,580	68,211	7,975	60,235	250,975	246,489
91	178,463	67,146	7,955	59,191	250,991	246,489
93	184,494	66,086	7,934	58,152	251,007	246,489
95	190,674	65,031	7,912	57,118	251,023	246,489

Temperatura en 5 [°F]	Presión en 4 [psig]	Generación turbina [KW]	Consumo bomba [KW]	Generación Neta [KW]	Temperatura en 2 [°F]	Temperatura en 3 [°F]
97	197,006	63,979	7,889	56,090	251,039	246,489
99	203,494	62,933	7,865	55,068	251,054	246,489
101	210,138	61,891	7,839	54,051	251,070	246,489
103	216,942	60,853	7,813	53,040	251,086	246,489
105	223,908	59,820	7,785	52,035	251,103	246,489
107	231,038	58,792	7,756	51,036	251,119	246,489
109	238,336	57,769	7,726	50,043	251,135	246,489
111	245,803	56,750	7,694	49,056	251,151	246,489
113	253,442	55,736	7,662	48,075	251,168	246,489
115	261,256	54,728	7,628	47,100	251,184	246,489
117	269,247	53,723	7,592	46,131	251,201	246,489
119	277,419	52,724	7,555	45,169	251,217	246,489

Como se evidencia, la generación aumenta con la reducción de la temperatura de descarga, alcanzándose hasta 69,2 KW, pero con una diferencia de 1 °F entre el aire de enfriamiento y el refrigerante lo cual es difícil de mantener operativamente por lo que se toma como una optima temperatura de descarga 95 °F para mantener el criterio de diseño.

Ahora bien, teniendo la temperatura de 95 °F se evaluó la presión de descarga de la turbina (corriente 4) y los resultados se presentan a continuación.

Tabla 5.

Resultados evaluación presión de descarga turbina

Presión en 4 [psig]	Generación turbina [KW]	Consumo bomba [KW]	Generación Neta [KW]	ΔP AeroEnfriador [psi]
176	67,588	7,912	59,676	-4,674
181	66,697	7,912	58,784	0,326
186	65,826	7,912	57,914	5,326
191	64,976	7,912	57,064	10,326
196	64,144	7,912	56,232	15,326
201	63,332	7,912	55,419	20,326

Presión en 4 [psig]	Generación turbina [KW]	Consumo bomba [KW]	Generación Neta [KW]	ΔP AeroEnfriador [psi]
206	62,536	7,912	54,624	25,326
211	61,758	7,912	53,845	30,326

La baja presión en la descarga de la turbina favorece la generación debido al mayor cambio de entalpía, pero como se ve en la caída de presión del aroenfriador; los valores son inviables por lo que se optó por definir la presión de descarga de la turbina en 196 psig para mantener una caída de presión de 15 psi en el aroenfriador.

Finalmente, se ajustó simultáneamente la presión de descarga de la bomba (corriente 6) y el flujo de refrigerante que circula por el ciclo obteniéndose los resultados que me muestran a continuación.

Tabla 6.

Resultados evaluación presión descarga de bomba y flujo de refrigerante

Flujo R-717 [BPD]	Presión en 6 [psig]	Generación turbina [KW]	Generación Neta [KW]	Temperatura en 2 [°F]	Temperatura en 3 [°F]	MinApproach Intercambiador [°F]
5800	800	790,274	508,331	207,947	200,823	20,362
	840	811,413	525,366	208,145	205,160	16,966
	880	830,576	540,425	208,358	209,346	13,730
	920	847,879	553,624	208,586	213,393	10,638
	960	863,424	565,065	208,829	217,310	7,686
	1000	877,292	574,829	209,088	221,109	4,868
5840	800	795,724	513,343	207,630	200,823	20,141
	840	817,009	530,495	207,830	205,160	16,752
	880	836,304	545,658	208,044	209,346	13,522
	920	853,727	558,948	208,274	213,393	10,437
	960	869,379	570,468	208,518	217,310	7,490
	1000	883,342	580,299	208,779	221,109	4,680
5880	800	801,174	518,355	207,314	200,823	19,921
	840	822,605	535,625	207,515	205,160	16,538

Flujo R-717 [BPD]	Presión en 6 [psig]	Generación turbina [KW]	Generación Neta [KW]	Temperatura en 2 [°F]	Temperatura en 3 [°F]	MinApproach Intercambiador [°F]
	880	842,032	550,891	207,731	209,346	13,314
	920	859,574	564,273	207,961	213,393	10,235
	960	875,333	575,871	208,208	217,310	7,295
	1000	889,392	585,770	208,470	221,109	4,491
5920	800	806,624	523,367	206,997	200,823	19,700
	840	828,201	540,754	207,200	205,160	16,323
	880	847,760	556,124	207,417	209,346	13,106
	920	865,422	569,597	207,649	213,393	10,033
	960	881,288	581,275	207,897	217,310	7,099
	1000	895,443	591,240	208,162	221,109	4,302
5960	800	812,075	528,379	206,681	200,823	19,480
	840	833,797	545,884	206,885	205,160	16,109
	880	853,488	561,358	207,103	209,346	12,898
	920	871,269	574,921	207,337	213,393	9,831
	960	887,243	586,678	207,587	217,310	6,904
	1000	901,493	596,711	207,853	221,109	4,113
6000	800	817,525	533,391	206,365	200,823	19,260
	840	839,393	551,013	206,570	205,160	15,895
	880	859,216	566,591	206,790	209,346	12,690
	920	877,116	580,246	207,025	213,393	9,630
	960	893,197	592,081	207,277	217,310	6,709
	1000	907,543	602,181	207,545	221,109	3,924

Teniendo en cuenta los datos obtenidos se evidencia que la máxima generación se alcanza con un flujo de refrigerante de 5840 BPD y una presión de descarga de la bomba de 800 psig. La generación bruta es de 795,7 KW y la generación neta es de 513,3 KW tomando un MinApproach en el intercambiador de 20 °F, siendo resultados muy favorables para el campo de gas de estudio.

Adicionalmente, se realizó el dimensionamiento de tubería para un flujo de 5840 BPD en las corrientes de líquido y en las corrientes de gas teniendo en cuenta la ASME B16.5. Los

resultados se encuentran en la siguiente tabla donde el parámetro limitante fue la velocidad de flujo estipulada en las bases de diseño.

Tabla 7.

Dimensionamiento tuberías internas ciclo ORC

Corriente	Fase Liquido	Fase Gas
Clase	ANSI 150	ANSI 150
SCH	40	40
Diámetro [in]	4	8
Velocidad [ft/s]	6,7	56,7

Con este dimensionamiento se evidencia una tubería de bajo tamaño por lo que el ciclo de generación no requiere de un gran espacio para su construcción y puesta en marcha aportando buen flujo de energía eléctrica, para ayudar a reducir las emisiones en los procesos de generación con combustión.

9. CONCLUSIONES

- El refrigerante que mayor generación tuvo en el ciclo ORC, fue el R-717 debido a su amplio rango de operación que le permite mayor absorción de calor.
- Para el campo de gas de estudio se seleccionaron 8 corrientes de proceso con posible viabilidad para el ciclo ORC donde la mejor alternativa fue una corriente operativa a 5200 psig, 245 °F y 335,4 MMSCFD.
- La evaluación realizada a las variables del ciclo ORC permitió identificar las condiciones óptimas de operación las cuales conceden la máxima generación de energía, donde se alcanzan 795,7 KW brutos y 513,3 netos con las siguientes condiciones:
 - *Temperatura de descarga del aerofriador: 95 °F
 - *Presión de descarga de la turbina: 196 psig
 - *Presión de descarga de la bomba: 800 psig
 - *Flujo de refrigerante: 5840 BPD
 - *MinApproach en el intercambiador de calor: 20 °F
 - *Caída de presión en aerofriador: 15 psi
- Se realizó el dimensionamiento de las tuberías de líquido y gas del ciclo ORC siguiendo la ASME B16,5, donde se obtuvo para la fase líquida tubería ANSI 150 4 in-SCH 40 con una velocidad máxima de flujo de 6,7 ft/s y para la fase gas se obtuvo tubería ANSI 150 8 in-SCH 40 con una velocidad máxima de flujo de 56,7 ft/s.

Referencias Bibliográficas

- Andrea Crincoli Rondón, C., & Álvarez Brito, R. (2022). *Refrigerantes hidrocarburos como alternativa para los sistemas de refrigeración.*
- Andreasen, J. G., Larsen, U. ;, & Haglind, F. (2015). *Design of organic Rankine cycles using a non-conventional optimization approach.* APA.
- Barbosa, M. E. (2018). *Análisis del Ciclo de Rankine Orgánico Ideal mediante 8 Fluidos Orgánicos de Trabajo.*
- Barros Zarante, P. H., Vanegas Chamorro, M. C., & Polo, J. D. N. (2018). Feasibility evaluation of the use Organic Rankine Cycle (ORC) technology for energy production from exhaust gases recovery: a case study of local industry in Colombia. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(44), 2173–2180. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.85223>
- Carcasci, C., & Winchler, L. (2016). Thermodynamic Analysis of an Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery from an Aeroderivative Intercooled Gas Turbine. *Energy Procedia*, 101, 862–869. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.109>
- Cerrada, A., & Villanueva, Á. (2020). *Análisis de Ciclos de Rankine Orgánicos.*

- Chen, H., Goswami, D. Y., & Stefanakos, E. K. (2010). A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 9, pp. 3059–3067). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006>
- Colonna, P., Casati, E., Trapp, C., Mathijssen, T., Larjola, J., Turunen-Saaresti, T., & Uusitalo, A. (2015). Organic Rankine Cycle Power Systems: From the Concept to Current Technology, Applications, and an Outlook to the Future. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137(10). <https://doi.org/10.1115/1.4029884>
- Eyidogan, M., Canka Kilic, F., Kaya, D., Coban, V., & Cagman, S. (2016). Investigation of Organic Rankine Cycle (ORC) technologies in Turkey from the technical and economic point of view. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 58, pp. 885–895). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.158>
- GasesGrit. (2020). *Ficha Técnica R-152A*. www.gasesgrit.com
- GasesGrit. (2020). *Ficha Técnica R-170*. www.gasesgrit.com
- GasesGrit. (2020). *Ficha Técnica R-290*. www.gas-servei.com
- GasesGrit. (2020). *Ficha Técnica R-600*. www.gasesgrit.com
- Gasservei. (2020). *Ficha Técnica R-134A*. Retrieved December 18, 2024, from www.gas-servei.com

- Gas Processors, & Suppliers Association. (2004). Engineering Databook. *Sherlock's Diseases of the Liver and Biliary System, 12th Edition*, 1–771. <https://doi.org/10.1002/9781444341294>
- Hijriawan, M., Himawanto, D. A., Pambudi, N. A., & Arifin, Z. (2022). Organic Rankine Cycle (ORC) system in renewable and sustainable energy development: A review of the utilization and current conditions for small-scale application. In *Journal of Applied Engineering Science* (Vol. 20, Issue 3, pp. 957–970). Institute for Educational Research. <https://doi.org/10.5937/jaes0-36319>
- International Association of Oil&Gas Producers. (2022). *Alternative thermodynamic cycles: energy efficiency compendium Alternative thermodynamic cycles Energy efficiency compendium*.
- Linde. (2020). Ficha de Datos de Seguridad R-744. www.Linde.Co.
- Manrique, V. (2015). *Tecnología para recuperación de calor residual en estaciones compresoras de gas natural: Ciclo Orgánico de Rankine*. <http://catoilandgas.cat.com>
- Ochoa, G. V., Gutierrez, J. C., & Forero, J. D. (2020). Exergy, economic, and life-cycle assessment of ORC system for waste heat recovery in a natural gas internal combustion engine. *Resources*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/resources9010002>

Post Guillen Jalal Zia, D. (2013). *Final Report Modifications and Optimization of the Organic Rankine Cycle to Improve the Recovery of Waste Heat*. <http://www.inl.gov>

Prado, A. (2023). Refrigerantes. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria*, 136.

Quoilin, S. (2008). *An introduction to thermodynamics applied to Organic Rankine Cycles*.

Quoilin, S., Broek, M. Van Den, Declaye, S., Dewallef, P., & Lemort, V. (2013). Techno-economic survey of organic rankine cycle (ORC) systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 22, pp. 168–186). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>

Rettig, A., Ch, A. R., Lagler, M., Mahadea, V., Mu, V. M., Mccallion, S., Rettig, A., Lagler, M., Lamare, T., Li, S., Mahadea, V., Mccallion, S., & Chernushevich, J. (2011). *Application of Organic Rankine Cycles (ORC)*.

Rusev, T. M. (2014). *Comparative Study of Different Organic Rankine Cycle Models: Simulations and Thermo-Economic Analysis for a Gas Engine Waste Heat Recovery Application*.

Sánchez, L., & Fiter, J. (2012). *Aplicación del Ciclo Orgánico de Rankine para el aprovechamiento de calor residual en una refinería*.

Tchanche, B. F., Loonis, P., Petrisans, M., & Ramenah, H. (2013). Organic Rankine cycle systems: Principles, opportunities and challenges. *2013 25th International Conference on Microelectronics, ICM 2013*. <https://doi.org/10.1109/ICM.2013.6735014>