

Ciclo Orgánico de Rankine: una alternativa de uso de los gases de combustión del biogás como
fuente de alta

Maria Camila Bravo Bohada y Silvia Fernanda Galvis Barrios

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Química

Modalidad Presencial

Director

Humberto Escalante Hernández

Doctor en Ingeniería Química

Codirectora

Liliana del Pilar Castro Molano

Doctora en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería química

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

“Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo de grado.

En primer lugar, a mi madre, por su apoyo incondicional, su amor y su fe en mí. Gracias por estar siempre a mi lado, animándome a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mi familia, por su sabiduría y cariño, que han sido fundamentales en mi vida y en mi formación.

A mis compañeros incondicionales, Jesús y Yaiza, por su constante apoyo y amistad.

A mi novio Andrés, por su amor, comprensión y apoyo inquebrantable. Gracias por estar siempre a mi lado, animándome y motivándome a alcanzar mis metas.

*A mi mascota Pikiro, por su compañía y alegría diaria.”- **Mariacé***

“A la vida, a la existencia y en especial a mí misma, gracias por todo lo que me ofrecen, todo lo que puedo disfrutar y todo lo que puedo lograr.

A las personas que han sido parte de mi camino, que a pesar de llamarnos “compañeros” en el fondo fuimos amigos, y a todos los guías que marcaron el camino para llegar hasta donde estoy.

*A la familia que me ha dado todo y por la que quiero dar todo, a mis padres, Martha Barrios y Mauricio Galvis, a mi hermano, Felipe Galvis, a mi pareja, Daniel Forero, y al mayor motor de mi vida, mi eterno amor, mi sobrino, Gabriel Galvis, todo de mí es exclusivamente para él.” - **Silvia***

Agradecimientos

A mis profesores y mentores, por su guía y sus conocimientos. En especial, agradecemos a Humberto Escalante, nuestro director, y a Liliana Castro, nuestra co-directora, por su paciencia, sus valiosos consejos y su dedicación en la supervisión de este proyecto.

Un agradecimiento especial a Juan Guillermo, nuestro asesor, por su guía experta y su apoyo constante a lo largo de este trabajo. También a la profe Ruth Navas, que nos ayudó a encontrar herramientas para el manejo del trabajo de grado.

Finalmente, a nuestros compañeros del grupo de investigación de Digestión Anaerobia por ser nuestros compañeros de viaje en esta aventura llena de desafíos y aprendizajes.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	17
1.1. Objetivo general.....	17
1.2. Objetivos específicos	17
2. Marco Conceptual.....	18
2.1. El biogás y sus usos	18
2.2. Máquina térmica.....	20
2.3. Ciclo Orgánico de Rankine y su funcionamiento.....	21
2.3.1. Ciclo Orgánico de Rankine Regenerativo.....	22
2.4. Fluidos de trabajo.....	23
2.5. Software empleado para el modelamiento del COR.....	24
3. Estado de arte	25
3.1. Desempeño en Diferentes Aplicaciones y Fuentes de Calor	25
3.2. Simulación del COR utilizando la combustión de biogás como fuente de alta	26
4. Metodología	27
4.1. Etapa 1: Revisión bibliográfica.....	28
4.1.1. Selección de los fluidos de trabajo.....	28
4.1.2. Selección del software	28
4.2. Etapa 2: Evaluación del tipo de fluido de trabajo y composición del biogás.....	29
4.2.1. Selección del contenido de metano del biogás	29

4.2.2. Selección de la eficiencia del expansor.....	29
4.2.3. Simulación del COR a condiciones del expansor E15H022A-SH	29
4.2.4. Parámetro para evaluar el rendimiento del biogás	31
4.2.5. Parámetros para evaluar el desempeño del COR	31
4.3. Etapa 3: Simulación COR para un caso de aplicación en Villa Porkinos	32
4.3.1. Descripción del caso de estudio en Villa Porkinos	32
4.3.2. Simulación a las condiciones de Villa Porkinos	32
4.3.2.1. Simulación COR para Villa Porkinos.....	32
4.3.2.2. Simulación CORR para Villa Porkinos.	33
4.3.2.3. Parámetro para evaluar energía producida (Wh).	33
5. Resultados	33
5.1. Etapa 1: Revisión bibliográfica	33
5.1.1. Selección de los fluidos de trabajo.....	33
5.1.2. Selección del software	35
5.2. Etapa 2: Evaluación del tipo de fluido de trabajo y composición del biogás	35
5.2.1. Definición del contenido de metano del del biogás a utilizar	35
5.2.2. Selección de la eficiencia del expansor	36
5.2.3. Simulación del COR a condiciones del expansor E15H022A-SH	37
5.2.4. Efecto de la calidad del biogás en el Ciclo Orgánico de Rankine	43
5.3. Etapa 3: Simulación COR para un caso de aplicación en Villa Porkinos	45
5.3.1. Simulación a las condiciones de Villa Porkinos	45
5.3.2. Resultados para la simulación del COR y CORR.....	47

6. Conclusiones	50
7. Recomendaciones.....	52
Referencias Bibliográficas	53
Apéndices.....	65

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Ficha técnica del Expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW</i>	30
Tabla 2. <i>Propiedades de los fluidos de trabajo a analizar en el desempeño del COR</i>	34
Tabla 3. <i>Resultados y definición de la calidad de biogás</i>	36
Tabla 4. <i>Matriz de diseño para la simulación del COR</i>	36
Tabla 5. <i>Eficiencias experimentales de turbinas tipo expansor en la literatura</i>	36
Tabla 6. <i>Flujo másico a partir de la naturaleza del fluido de trabajo</i>	37
Tabla 7. <i>Suposiciones por etapa para COR a condiciones del expansor E15H022A-SH</i>	38
Tabla 8. <i>Condiciones por sustancia para COR a condiciones del expansor E15H022A-SH</i>	38
Tabla 9. <i>Resultados de simulación del COR a condiciones del expansor E15H022A-SH</i>	39
Tabla 10. <i>Condiciones de los refrigerantes para COR a condiciones optimizadas</i>	41
Tabla 11. <i>Resultados de simulación del COR a condiciones optimizadas</i>	41
Tabla 12. <i>Condiciones por sustancia para COR a condiciones de Villa Porkinos</i>	46
Tabla 13. <i>Condiciones por sustancia para CORR a condiciones de Villa Porkinos</i>	47
Tabla 14. <i>Resultados de simulación del COR a condiciones de Villa Porkinos</i>	48
Tabla 15. <i>Resultados de simulación del CORR a condiciones de Villa Porkinos</i>	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Diferentes usos del biogás</i>	18
Figura 2. <i>Diagrama de flujo de una máquina térmica</i>	20
Figura 3. <i>Diagrama del COR</i>	21
Figura 4. <i>Diagrama del CORR</i>	22
Figura 5. <i>Diagrama de Flujo General de la metodología</i>	28
Figura 6. <i>Diagrama del COR a condiciones del expansor E15H022A-SH</i>	37
Figura 7. <i>Diagrama presión entalpía para los fluidos de trabajo</i>	40
Figura 8. <i>Diagrama Entalpía-Presión de los refrigerantes a condiciones óptimas e iniciales</i> ... 42	
Figura 9. <i>Eficiencia del COR para todos los fluidos de trabajo</i>	42
Figura 10. <i>Energía producida respecto todos los fluidos de trabajo</i>	43
Figura 11. <i>COR respecto a la calidad del biogás por fluido de trabajo</i>	43
Figura 12. <i>Rendimiento del biogás a las calidades seleccionadas</i>	44
Figura 13. <i>Diagrama del COR a condiciones de Villa Porkinos</i>	45
Figura 14. <i>Diagrama del CORR a condiciones de Villa Porkinos</i>	46
Figura 15. <i>Efecto del regenerador en la energía producida respecto al fluido de trabajo</i>	49
Figura 16. <i>Efecto del regenerador en la eficiencia del ciclo respecto al fluido de trabajo</i>	49
Figura 17. <i>Diagrama de presión entalpía para los fluidos de trabajo</i>	50

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A Diferencias en los enfoques del uso indirecto del biogás	65
Apéndice B . Diferencias en los enfoques del uso indirecto del biogás	66
Apéndice C Características del Ciclo de Rankine y el Ciclo Orgánico de Rankine	68
Apéndice D Características de los diferentes grupos de fluidos para el COR	69
Apéndice E Referencias de la producción y contenido de biogás en biodigestores Datos registrados para producción y contenido de biogás en biodigestores	70
Apéndice F	70
Apéndice G Proceso de condensación para el objetivo 1	71
Apéndice H Límites de aplicación de los compuestos empleados.....	75
Apéndice I Proceso politrópico	76
Apéndice J Complemento de resultados objetivo 1 de ciclos con AGUA	78
Apéndice K Complemento de resultados objetivo 1 de ciclos con ETANOL.....	83
Apéndice L Complemento de resultados objetivo 1 de ciclos con R123	88
Apéndice M Complemento de resultados objetivo 1 de ciclos con R245FA	93
Apéndice N Complemento objetivo 1 de ciclo con R123 a condiciones optimizadas.....	98
Apéndice O Complemento objetivo 1 de ciclo con R245FA a condiciones optimizadas ..	103
Apéndice P Complemento de resultados objetivo 2 de ciclos con R123	108
Apéndice Q Complemento de resultados objetivo 2 de ciclos con R245FA	111
Apéndice R Complemento de resultados objetivo 2 de ciclos con ETANOL.....	114
Apéndice S Complemento de resultados objetivo 2 de ciclos con AGUA	117

Apéndice T	Complemento objetivo 2 de ciclos con R123 empleando regeneración	120
Apéndice U	Complemento objetivo 2 de ciclos con ETANOL empleando regeneración.....	123
Apéndice V	Complemento objetivo 2 de ciclos con R245FA empleando regeneración	127
Apéndice W	Complemento objetivo 2 de ciclos con AGUA empleando regeneración	130
Apéndice X	Enlace de la simulación y del Excel.	135

Nomenclatura

COR	Ciclo Orgánico de Rankine
CORR	Ciclo Orgánico de Rankine Regenerativo
CRT	Ciclo de Rankine Tradicional
M	Flujo másico (kg/h ó kg/s)
m	Flujo molar (kmol/s)
η	Eficiencia del expansor (%)
η_{iseb}	Eficiencia isentrópica de la bomba
η_T	Eficiencia térmica del ciclo (%)
PAO	Potencial de agotamiento de la capa de ozono
PCG	Potencial de calentamiento global
Pcrit	Presión crítica (kPa)
Q	Caudal de biogás (m ³ /h)
Qalta	Cantidad de calor suministrada al fluido de trabajo desde una fuente de temperatura alta (horno)
Qbaja	Cantidad de calor rechazada del fluido de trabajo en el condensador hacia un sumidero de temperatura baja (atmósfera, río, etcétera)
R	Rendimiento del ciclo (Wh/m ³ de biogás ó kWh/m ³ de biogás)
Rbiogás	Rendimiento calórico del biogás (Wh/m ³ de biogás)
Tb	Temperatura de baja (°C)
Tcrit	Temperatura crítica (°C)
Teb	Temperatura de ebullición (°C)
Th	Temperatura de alta (°C)
TVA	Tiempo de vida en la atmósfera (años)
V	Flujo volumétrico (m ³ /s)
Wútil	Trabajo útil

Resumen

Título: Ciclo Orgánico de Rankine: una alternativa de uso de los gases de combustión del biogás como fuente de alta.

Autor: Maria Camila Bravo Bohada y Silvia Fernanda Galvis Barrios¹

Palabras Clave: Simulación en Aspen Plus, Ciclo Orgánico de Rankine (COR), Ciclo Orgánico de Rankine Regenerativo (CORR), fluidos de trabajo, biogás, eficiencia energética, contenido de metano del biogás.

Descripción: El aprovechamiento del calor en plantas de biogás enfrenta desafíos debido a costos y falta de demanda calórica, lo que puede generar desperdicio de energía. Este trabajo evaluó, mediante Aspen Plus V.14., el desempeño del COR frente a un Ciclo de Rankine convencional, considerando restricciones del expansor, composición del biogás y fluidos de trabajo. También se analizó el efecto del fluido y configuración del ciclo en un caso aplicado a la granja Villa Porkinos, en Lebrija, Santander.

Los resultados destacan que, para bajas temperaturas de evaporación, los refrigerantes R123 y R245fa son ideales, mientras que el etanol sobresale a gran escala. La composición del biogás afecta el rendimiento, requiriendo mayor volumen con menor contenido de metano y permitiendo una mayor energía transformada. Se sugiere estudiar al bioetanol como fluido de trabajo, así como refrigerantes de bajo impacto ambiental de manera experimental.

¹ Facultad de Ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Grupo de investigación en Tecnologías de Valorización de Residuos y Fuentes Agrícolas e Industriales para la Sustentabilidad. Director: Humberto Escalante Hernández. Ingeniero químico, PhD. Codirector: Liliana del Pilar Castro Molano. Ingeniera química, PhD.

Abstract

Title: Organic Rankine Cycle: an alternative use of biogas combustion gases as a heat source ²

Author(s): Maria Camila Bravo Bohada y Silvia Fernanda Galvis Barrios ³

Key Words: Simulation based on real conditions, Organic Rankine Cycle (ORC), working fluids, biogas, energy efficiency, biogas quality, Aspen Plus.

Description The utilization of heat in biogas plants faces challenges due to costs and the lack of heat demand, which can lead to energy waste. This study evaluated, using Aspen Plus V.14, the performance of the ORC compared to a conventional Rankine Cycle, considering expander restrictions, biogas composition, and working fluids. Additionally, the effect of the working fluid and cycle configuration was analyzed in a case study applied to Villa Porkinos farm in Lebrija, Santander.

The results highlight that, for low evaporation temperatures, refrigerants R123 and R245fa are ideal, while ethanol performs better on a larger scale. Biogas composition impacts performance, requiring higher volumes with lower methane content and enabling greater energy conversion. It is suggested to experimentally study bioethanol as a working fluid, as well as low environmental impact refrigerants.

² Degree Work

³ Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Research group on Waste Recovery Technologies and Agricultural and Industrial Sources for Sustainability. Director: Humberto Escalante Hernández. Chemical engineer, PhD. Co-director: Liliana del Pilar Castro Molano. Chemical engineer, PhD.

Introducción

El biogás, producto de la digestión anaerobia (DA) de residuos orgánicos, contiene metano en promedio entre el 50% y el 70% (Martí Herrero, 2019). El biogás se utiliza usualmente como energía térmica para la cocción de alimentos y a gran escala en la transformación de la energía química del metano en energía eléctrica mediante un proceso de oxidación en motores de combustión (Deublein & Steinhauser, 2008).

En Colombia, la implementación de la DA a gran escala se ha asociado principalmente para: tratamiento de aguas residuales, residuos de palma, residuos lácteos y residuos de cervecerías. En esas empresas el biogás se utiliza para satisfacer sus necesidades energéticas en los procesos de producción. No obstante, la mayoría de las empresas reportan que solo aprovechan hasta el 30% del biogás producido, mientras que el 70% restante suele eliminarse mediante combustión en teas (Tavera-Ruiz et al., 2023). El aprovechamiento del excedente de biogás se convierte en un desafío, debido a su bajo valor económico, la complejidad de su distribución y el costo de inversiones adicionales para infraestructura de unidades de purificación y acondicionamiento (Bacenetti et al., 2019; Nevzorova & Kutcherov, 2019).

Por lo anterior, surge la necesidad de plantear alternativas para maximizar el aprovechamiento del biogás, mediante la transformación de su energía química en otros tipos de energías que permitan aumentar su eficiencia. Una de las alternativas más asequibles, para los sectores industriales que generan biogás a gran escala, es optimizar su uso sometándolo a combustión en un horno y utilizarlo como fuente de alta para ser entregado a un ciclo

termodinámico de potencia; los cuales permiten la transformación de energía calórica a energía eléctrica (Anastasovski et al., 2020).

La máquina de potencia denominada Ciclo Rankine Tradicional (CRT), usualmente utiliza como “fluido de trabajo” agua, permitiendo que su vaporización y expansión se lleve a cabo a gradientes de presión medios o elevados. Sin embargo, el ciclo de Rankine puede ser operado con vaporización a presiones bajas utilizando fluidos orgánicos especiales; denominándose Ciclo Orgánico de Rankine (COR). Dentro de los fluidos de trabajo orgánicos más utilizados en el COR se encuentran: hidrocarburos, refrigerantes, éteres, alcoholes o siloxanos (Quoilin et al., 2013).

El COR se destaca por no requerir altas presiones ni temperaturas en comparación con el CRT. Adicionalmente, el COR es de bajo costo y mantenimiento debido a que no requiere sobrecalentamiento posterior al expansor (Quoilin et al., 2013; Rahbar et al., 2017). El COR puede integrar corrientes de bajo, mediano y alto calor provenientes de fuentes de energía renovable como el calor residual, energía solar, energía geotérmica, biomasa y gas (Landelle et al., 2017).

A pesar de que el COR ha sido estudiado ampliamente con diferentes fuentes de calor, en el caso de usar el biogás como fuente de calor los estudios son limitados. Referente a los fluidos de trabajo del COR, estudios previos han evaluado el 1-butanol, metilciclohexano, isobutanol y tolueno, siendo estos una solución recomendada para ciclos que operan en zonas rurales (Mudasar et al., 2017; Qyyum et al., 2021) . Sin embargo, la bibliografía no reporta estudios de COR en los cuales se utilice como fluido de trabajo, sustancias con menor impacto ambiental.

Por lo arriba expuesto, surge la pregunta: ¿Cuál es la eficiencia del COR cuando es operado utilizando como fluidos de trabajo: R123, R245fa y etanol, y recibiendo el calor de alta a partir de la energía térmica entregada por la combustión del biogás? Para dar respuesta a la pregunta, en este trabajo de grado, modalidad investigación, se planteó como objetivo principal evaluar el desempeño del COR empleando fluidos de trabajo de diferente naturaleza (R123, R245fa, etanol y agua) y utilizando como fuente de alta la energía calórica obtenida por la combustión de biogás de diferentes contenidos de metano. Para el estudio se simularon los procesos que se llevan a cabo en la máquina térmica (COR) en el software Aspen Plus; permitiendo evaluar la eficiencia de la máquina como una función del tipo de fluido de trabajo y la composición del biogás.

Adicionalmente, en Lebrija, Santander, se encuentra ubicada Villa Porkinos, una granja porcícola que cuenta con aproximadamente 2.300 cerdos. Para la gestión del estiércol producido han hecho acopio de la tecnología de digestión anaerobia. Villa Porkinos posee 16 digestores anaerobios de 40 m³ cada uno, llegando a producir en promedio hasta 128 m³/día de biogás. Por lo anterior, como segundo objetivo de este trabajo, se plantea evaluar a escala real el potencial del COR para convertir la energía térmica proporcionada por el biogás en electricidad, con el fin de reintegrarla a la granja que se ha tomado como caso de estudio.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar el biogás para suministrar calor de alta en un Ciclo Orgánico de Rankine (COR) que utiliza como fluido de trabajo: R123, R245fa, etanol y agua.

1.2. Objetivos específicos

- Evaluar el Ciclo Orgánico de Rankine (COR) usando Apen Plus V.14 como herramienta de simulación para un diseño a condiciones del prototipo de máquina de potencia presente en el laboratorio de procesos de la Escuela de Ingeniería Química.

- Simular el Ciclo Orgánico de Rankine (COR) y el Ciclo Orgánico de Rankine Regenerativo (CORR) empleando datos reales del caso de estudio de la granja porcícola Villa Porkinos en Lebrija, Santander.

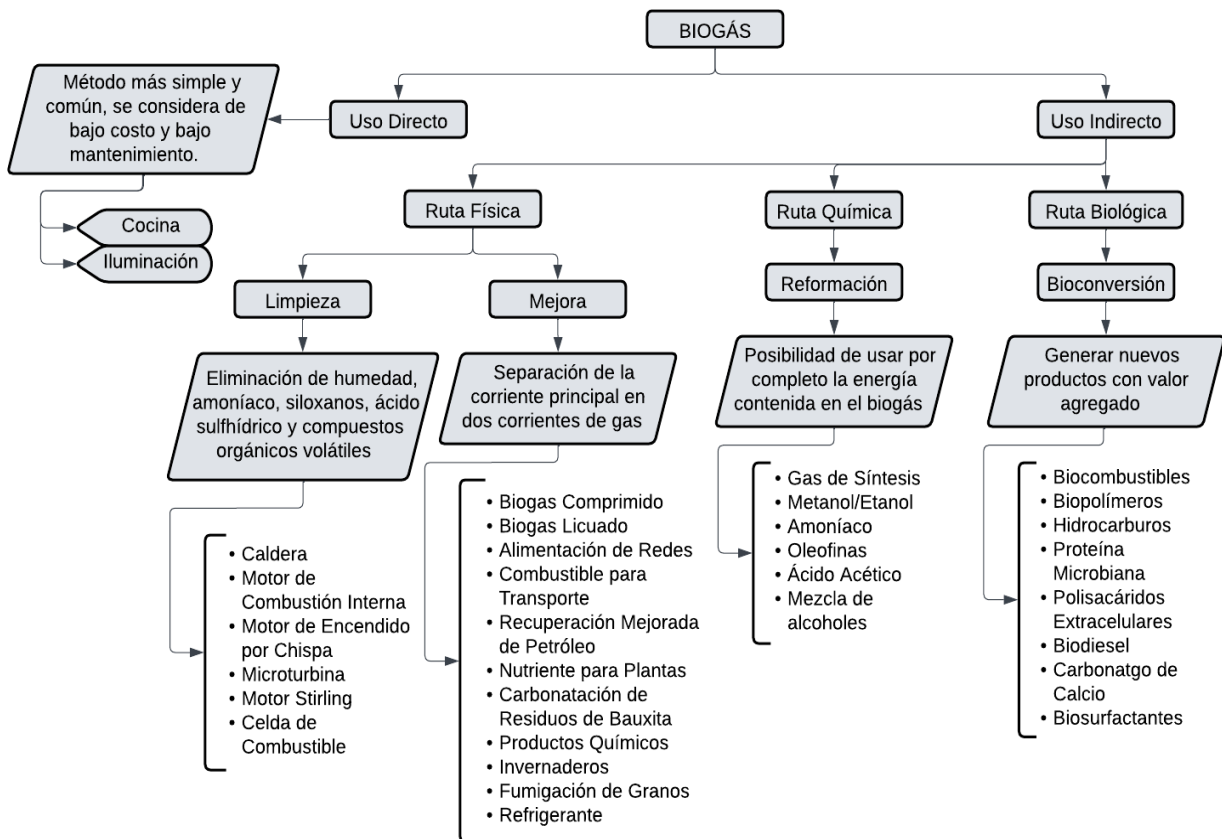
2. Marco Conceptual

2.1. El biogás y sus usos

El biogás producto de la digestión anaerobia presenta diversas aplicaciones (figura 1). La forma más simple y económica de utilizar el biogás es emplearlo directamente en estufas para cocinar alimentos y en lámparas para calefacción e iluminación. Sin embargo, mientras que en las casas rurales se utiliza de manera eficiente, en industrias con digestores a gran escala no se logra aprovechar toda la capacidad de producción (Kapoor et al., 2020; Tavera-Ruiz et al., 2023).

Figura 1

Diferentes usos del biogás



Nota. Adaptado de (Kapoor et al., 2020).

Dada la composición promedio del biogás (metano (CH_4) 40-65%, dióxido de carbono (CO_2) 35-55%, y sulfuro de hidrógeno (H_2S) 0,1-3% (Kapoor et al., 2019) su uso plantea desafíos significativos. Mientras que el CH_4 facilita la combustión del biogás, el CO_2 , al ser menos energético, reduce su valor calórico y limita su transportabilidad, impactando así la eficiencia energética del biogás. Además, se deben considerar el H_2S y otros componentes que pueden causar corrosión en los equipos mecánicos. Debido a estas características en la composición del biogás, es necesario evaluar cuál de las rutas de aplicación, física, química o biológica, es la más favorable para maximizar su utilización (apéndice A).

La ruta física se destaca por su mayor flexibilidad frente a impurezas y condiciones de operación. Su principal restricción es la necesidad de eliminar la humedad del biogás para evitar la corrosión y el deterioro de los equipos. En contraste, los métodos químico y biológico requieren una purificación más exhaustiva (Kapoor et al., 2020). Dentro de la ruta física, se incluyen diversos procesos y operaciones, como el uso de calderas y motores de combustión interna, para maximizar el aprovechamiento de la energía contenida en el biogás (apéndice B).

Es importante considerar que las barreras más significativas para el uso del biogás como fuente de energía radican en los aspectos técnicos y económicos. Entre estos, se destacan los altos costos de inversión y mantenimiento, así como la falta de capital económico e intelectual. Estos factores juegan un papel crucial en la decisión de adoptar nuevas tecnologías para el biogás (Nevzorova & Kutcherov, 2019). De las opciones evaluadas, la caldera se destaca por su mejor desempeño, así como por requerir una menor inversión y esfuerzo para su implementación.

Es importante mencionar que la caldera, por sí sola, no aprovecha completamente la energía obtenida de la combustión del biogás; por lo tanto, es necesario adaptar un sistema de

generación combinado de calor y electricidad (CHP) que recupere el calor residual de la combustión y lo transforme en electricidad. Esta cogeneración aumenta la eficacia del proceso, permitiendo alcanzar eficiencias eléctricas del 40% y una suma de eficiencias eléctrica y térmica entre el 85% y el 90% (Allegue et al., 2012). En este contexto, se estudiará el desempeño del COR como alternativa para el aprovechamiento del calor residual.

2.2. Máquina térmica

Una máquina térmica es un dispositivo diseñado para transformar energía térmica en trabajo mecánico (figura 2). Esto se realiza tomando calor de una fuente a alta temperatura (Q_{Alta}), transforma parte de este calor en trabajo (usualmente en la forma de una flecha rotatoria ($W_{útil}$)) y rechazan el calor de desecho hacia un pozo de baja temperatura (Q_{baja}), operando en un ciclo. Para que la máquina térmica funcione se requiere de un fluido de trabajo, cuya función corresponde a absorber y ceder calor a lo largo de un ciclo termodinámico (Van Wylen et al., 2000).

Figura 2

Diagrama de flujo de una máquina térmica



Nota. Adaptado de (Van Wylen et al., 2000)

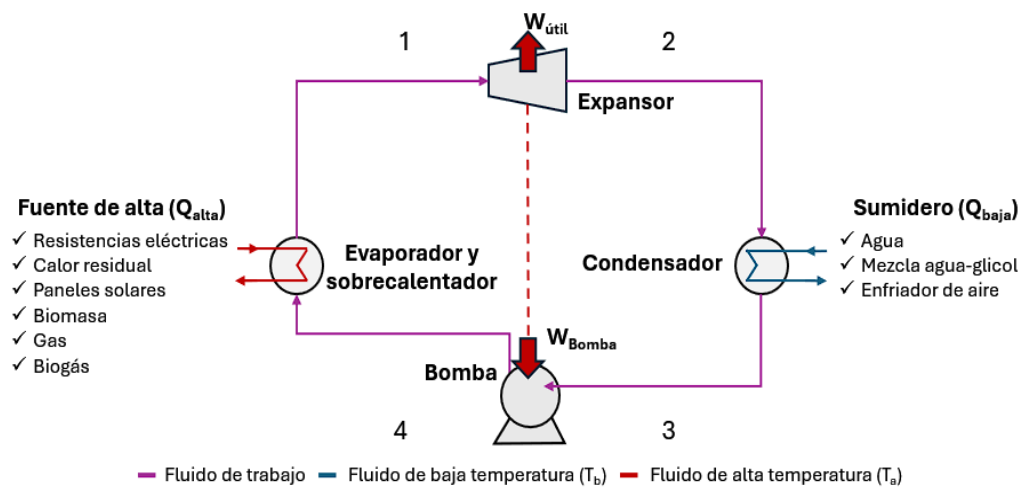
2.3. Ciclo Orgánico de Rankine y su funcionamiento

El COR es una máquina que se fundamenta en el cambio de fase de un fluido orgánico, como hidrocarburos, refrigerantes, éteres, alcoholes y siloxanos. Esta es la configuración más simple y con menor número de componentes. Inicia en el evaporador cuando el fluido absorbe el calor de la fuente hasta llegar a un estado de vapor sobrecalentado, posteriormente se expande y su energía se transforma en energía mecánica que se entrega al expansor en donde se transforma a energía eléctrica. Por último, se condensa y se bombea nuevamente al evaporador (figura 3).

La eficiencia térmica del COR oscila entre el 5% y el 25% (Ji et al., 2023; Quoilin et al., 2013; Tchanche et al., 2013). El COR tiene bajo costo por unidad de potencia producida (1.250 – 2.800 \$/kW), en comparación con el Ciclo de Kalina (2.500 – 6.500 \$/kW), el ciclo transcrito de CO₂ (5.000 – 6.500 \$/kW) y el generador termoeléctrico (3.000 – 17.000 \$/kW) (Ji et al., 2023).

Figura 3

Diagrama del COR



Nota. Adaptado de (Lecompte et al., 2015)

El COR comienza con la vaporización y sobrecalentamiento (corrientes 4 y 1) del fluido de trabajo utilizando diversas fuentes de calor, como resistencias eléctricas, quema de combustible,

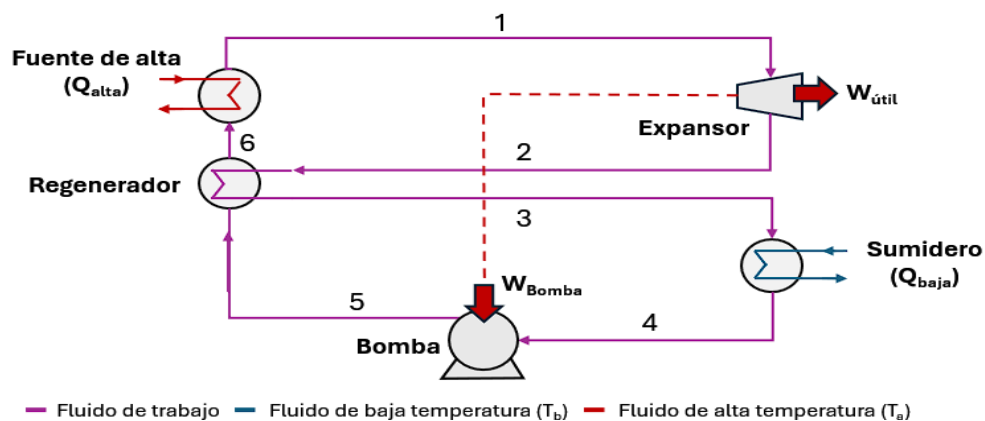
calor residual, paneles solares, biomasa o gas (Landelle et al., 2017). Posteriormente, el fluido se expande (corrientes 1 y 2), transformando su energía interna en energía mecánica, que luego se convierte en energía eléctrica (Qiu et al., 2011). A continuación, el fluido se condensa (corrientes 2 y 3) mediante un intercambio de calor con un medio de enfriamiento, comúnmente agua. Finalmente, el fluido es comprimido (corrientes 3 y 4) para reiniciar el ciclo.

2.3.1. Ciclo Orgánico de Rankine Regenerativo

El Ciclo Orgánico de Rankine Regenerativo (CORR) tiene una adecuación respecto al ciclo básico, en el cual se incorpora un intercambiador de calor adicional llamado regenerador (figura 4). El regenerador aprovecha el calor de la corriente de vapor agotado del expansor para precalentar el fluido de trabajo antes del evaporador, reduciendo el flujo de fluido de enfriamiento y de biogás empleado (Lecompte et al., 2015a; Peris et al., 2013).

Figura 4

Diagrama del CORR



Nota. Adaptado de (Lecompte et al., 2015)

La eficiencia térmica (η) es la medida del desempeño de los COR y se define como la fracción de la cantidad de calor suministrado que se convierte en trabajo neto, donde el trabajo neto corresponde a la diferencia del trabajo producido por el expansor y los elementos auxiliares al ciclo que requieren el suministro de energía eléctrica (Van Wylen et al., 2000) .

$$\eta_T = \frac{\text{Trabajo del Expansor} - \text{Trabajo de la Bomba}}{\text{Calor Suministrado}} * 100\% \quad (\text{Ec. 1})$$

2.4. Fluidos de trabajo

La selección del fluido de trabajo para el COR es importante debido a las propiedades termodinámicas que afectan la eficiencia, el dimensionamiento y la viabilidad económica del sistema. Por consiguiente, se opta por fluidos de trabajo que garanticen buena eficiencia del ciclo y bajo calor latente de vaporización. Se prefieren los fluidos con baja inflamabilidad y toxicidad, para prevenir la exposición del personal a sustancias perjudiciales. Por último, se antepone un fluido de trabajo que tenga un mínimo potencial de agotamiento de la capa de ozono (PAO), respecto al estándar que corresponde a un valor de 1 para el R11, y el potencial de calentamiento global (PCG), comparado con el CO₂ (Qyyum et al., 2021).

Los fluidos de trabajo en el COR se clasifican como: a) hidrocarburos, b) refrigerantes, c) siloxanos, d) éteres y e) alcoholes (apéndice D). Sin embargo, no hay un fluido identificado como óptimo para generalizar su aplicación en COR y que pueda satisfacer todos los requisitos de manera simultánea (Bao & Zhao, 2013).

Los fluidos orgánicos se clasifican en húmedos, isoentrópicos y secos según la pendiente de su curva de vapor saturado. Los fluidos de interés para este tipo de aplicación corresponden a

los secos e isoentrópicos porque no requieren sobrecalentamiento para evitar la condensación dentro de la turbina y los daños asociados al impacto de las gotas, asimismo, requieren menor área de transferencia de calor en el evaporador y el mantenimiento del expansor es más sencillo, disminuyendo los costos asociados al funcionamiento del sistema (Mahmoudi et al., 2018).

2.5. Software empleado para el modelamiento del COR

Existen dos categorías de software ampliamente utilizadas en este contexto. La primera corresponde a la creación de un código personalizado con herramientas como EES, Matlab/Simulink o Python, que permiten cálculos termodinámicos al vincularse con bases de datos como REFPROP o CoolProp. La segunda se basa en librerías preexistentes, como Modelica, Aspen Plus o Aspen HYSYS, con modelos definidos para los equipos (Liu et al., 2018).

La selección del software depende del grado de detalle del modelado termodinámico del COR. El modelado cero dimensional (0-D) no tiene restricciones en la selección del software porque se centra en la evaluación del desempeño general del sistema, siendo útil para evaluaciones preliminares de diseño. Por otro lado, el modelado unidimensional (1-D) introduce relaciones matemáticas y variaciones para un análisis más detallado de los componentes (intercambiadores de calor, bombas, etc.) y el modelado tridimensional (3-D) analiza los patrones de flujos y la transferencia de calor en detalle (Lion et al., 2017; Liu et al., 2018; Moradi & Cioccolanti, 2024).

Las herramientas disponibles ofrecen distintos modelos precisos para el modelado de fluidos, un ejemplo es REFPROP. REFPROP es una base de datos que contiene las ecuaciones de estado explícitas en la energía de Helmholtz, incluye la ecuación modificada de Benedict-Webb-

Rubin y emplea modelos de estados correspondientes extendidos para garantizar una representación exacta de las propiedades de los fluidos (Aspen Plus V.14, n.d.; Huber et al., 2022).

3. Estado de arte

3.1. Desempeño en Diferentes Aplicaciones y Fuentes de Calor

El mercado del COR ha crecido exponencialmente desde principios de los años 1980, principalmente en los campos de biomasa, energía geotérmica y recuperación de calor residual (Quoilin et al., 2013). El COR ha alcanzado un éxito reciente, principalmente por su alta flexibilidad y su relativamente alta eficiencia de conversión en el rango de baja potencia (Colonna et al., 2015). Gracias a sus características, el COR es más apropiado que el ciclo de vapor tradicional para rangos de potencia moderados y aplicaciones de baja temperatura, como la recuperación de calor residual o la geotermia (Quoilin et al., 2013).

El COR puede alcanzar eficiencias termodinámicas del 10-20%, dependiendo de la fuente de calor y del fluido de trabajo seleccionado (Tchanche et al., 2011). La selección del fluido de trabajo es un proceso cuidadoso en el que se deben tener en cuenta los tipos de fuentes de calor, el nivel de temperatura y los índices de rendimiento (Bao & Zhao, 2013).

Wang et al. (2011) evaluaron varios fluidos de trabajo orgánicos para una aplicación de recuperación de calor residual centrándose en comparar el rendimiento del COR en términos de estos fluidos. Se concluyó que los fluidos R123, R245fa y R245ca tienen ventajas en sus regiones óptimas de trabajo, sin embargo, la región de trabajo factible del R123 hace que su desempeño sea ligeramente superior. Por otro lado, considerando el impacto ambiental y los niveles de seguridad,

los fluidos de trabajo más adecuados para una aplicación de recuperación de calor residual son el R245fa y el R245ca.

3.2. Simulación del COR utilizando la combustión de biogás como fuente de alta

El diseño del COR es complejo porque los aspectos fundamentales, como aquellos relacionados con los ciclos termodinámicos y la dinámica de fluidos, no pueden estudiarse sin tener en cuenta simultáneamente restricciones técnicas realistas (Colonna et al., 2015). Otro desafío es manejar las diversas condiciones límite utilizadas en la literatura, lo que dificulta la comparación justa, y a pesar de que se establecen claramente las condiciones límite, se debe tener en cuenta la falta de datos experimentales (Lecompte et al., 2015).

Para analizar, estudiar y optimizar el rendimiento de los COR, siendo las tecnologías más prevalentes y completas para la recuperación de energía térmica de baja calidad hoy en día, se requieren modelos de simulación flexibles y fiables (Ziviani et al., 2014). Herramientas como MATLAB, EES (Engineering Equation Solver), Aspen HYSYS y AspenPlus son comúnmente utilizadas para la simulación y evaluación de estos casos de recuperación de energía residual ya que permiten modelar y optimizar el rendimiento de COR, proporcionando una base sólida para el diseño y la implementación práctica de estos sistemas (Moradi & Cioccolanti, 2024).

Bao & Zhao (2013) concluyeron que el COR es una opción viable para la generación de energía a pequeña escala, con costos de inversión relativamente bajos en comparación con otras tecnologías de generación de energía renovable. Los factores clave para el éxito del desarrollo de un COR son la selección adecuada de fluidos de trabajo, la evaluación del diseño, la simulación de distintas condiciones y el desarrollo de prototipos para evaluar el desempeño real.

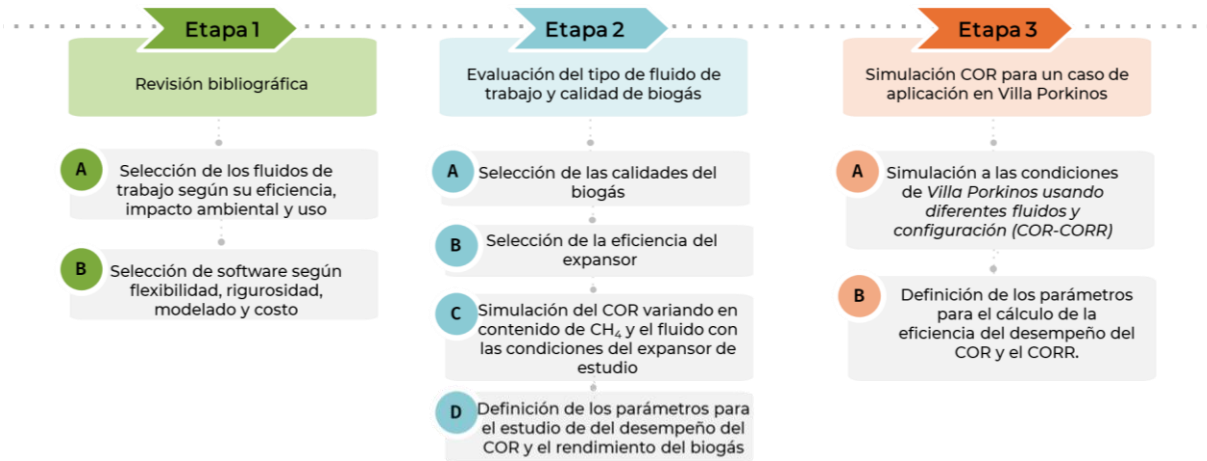
Previamente se han realizado simulaciones con la configuración directa con caldera usando biogás como fuente de alta, Qyyum et al. (2021) evaluaron fluidos como metilciclohexano, n-butanol e isobutanol en Aspen Hysys, donde concluyeron que el MCH, el butanol y el i-butanol son alternativas viables para el mejoramiento de la eficiencia de los COR. Mudasar et al. (2017) también analizó el rendimiento del sistema usando un diagrama T-s para un proceso con tolueno como fluido de trabajo, concluyendo que el sistema COR basado en la combustión de biogás y acoplado con una aplicación de generación combinada de calor y electricidad, puede ser una solución recomendada para las plantas de tratamiento en la ruralidad de residuos orgánicos junto a la generación de energía.

4. Metodología

El estudio del COR como alternativa para el aprovechamiento del biogás se estructuró en tres etapas (figura 5). En la primera etapa, se seleccionaron los fluidos de trabajo y el software a utilizar. En la segunda etapa, se evaluó el desempeño del biogás respecto a su composición, tomando como referencia las composiciones más recurrentes en la literatura, y se simuló el COR a las condiciones operativas del expansor *E15H022A-SH* con los fluidos de trabajo seleccionados en la etapa anterior. Finalmente, en la tercera etapa se simuló el COR y el CORR a las condiciones operativas del caso de estudio de Villa Porkinos y se comparó el impacto de los fluidos de trabajo seleccionados y el regenerador sobre la cantidad de energía producida.

Figura 5

Diagrama de Flujo General de la metodología



4.1. Etapa 1: Revisión bibliográfica

4.1.1. Selección de los fluidos de trabajo

Para la selección de los fluidos de trabajo se consideraron los siguientes criterios:

- *Bajo potencial de calentamiento global (PCG)
- *Bajo potencial de agotamiento de la capa de ozono (PAO)
- *No tóxicos y preferiblemente no inflamables
- *Comúnmente usados y documentados en la literatura de aplicaciones del COR.

4.1.2. Selección del software

Para la selección de software se consideró una herramienta que ofrezca:

- *Ecuaciones de balance para el modelado adecuado del COR
- *Acceso a la información termodinámica en librerías preexistentes
- *Modelos definidos para el diseño preliminar de los equipos

Para el paquete termodinámico, se seleccionó uno que proporcione un modelado preciso de sustancias puras y las propiedades termodinámicas de los fluidos que se van a evaluar.

4.2. Etapa 2: Evaluación del tipo de fluido de trabajo y composición del biogás

4.2.1. Selección del contenido de metano del biogás

La composición del biogás se definió a partir del rango de composiciones registradas en la literatura para digestores anaerobios instalados en granjas que empleen estiércol de animales domésticos como alimento para los biodigestores, donde se tuvieron en cuenta el máximo, mínimo y promedio. Finalmente se propusieron 3 valores equidistantes.

4.2.2. Selección de la eficiencia del expansor

La eficiencia del expansor se seleccionó tomando como línea base las eficiencias experimentales reportadas en literatura de expansores con características y condiciones similares.

4.2.3. Simulación del COR a condiciones del expansor E15H022A-SH

El COR se simuló con los fluidos de trabajo seleccionados y como fuente de alta se empleó el calor suministrado por la combustión de biogás a las composiciones escogidas. El biogás se oxidó en una caldera con un exceso de aire del 21% para alcanzar la combustión completa (Hosseini & Wahid, 2013). Los gases de chimenea calentaron el fluido de trabajo con una eficiencia del 83% (Frost & Gilkinson, 2010), y salieron del proceso a una temperatura de 200°C conforme a la normativa ambiental vigente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

En el proceso de expansión del COR, se emplean turbinas similares a las de vapor, pero más compactas y con un mayor radio de expansión (Raab et al., 2021). Para este trabajo, se utilizó

como referencia el expansor E15H022A-SH del prototipo de máquina térmica del laboratorio de procesos de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander (UIS), adquirido a través del proyecto IAPP1819-269, en colaboración con la UIS y la *University of Northumbria*. En la tabla 1 se presentan las restricciones del expansor de referencia.

Tabla 1

Ficha técnica del Expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW

Parámetro	Unidad	Valor
Potencia nominal	kW	1
Desplazamiento	cm ³ /rev	14,5
Velocidad	RPM	500 – 3.600
Presión de entrada máxima	kPa	1.380
Temperatura de entrada máxima	°C	175

Nota. Tomado de: (Airsquared, 2018)

Las revoluciones por minuto (RPM) del expansor se tomaron como el valor común encontrado en la literatura de los expansores empleados en el COR, y se utilizaron para estimar el flujo másico (M) (Ec. 2). El flujo másico se calculó mediante la relación de desplazamiento o cilindrada proporcionada por el fabricante del expansor, un factor de conversión y la densidad del fluido a las condiciones de entrada al expansor (Airsquared, 2018; Verion ICESA, 2022). El fluido de trabajo ingresó al expansor a una temperatura de 160°C y una presión de 350 kPa para evitar inconvenientes con las restricciones.

$$M \left(\frac{kg}{h} \right) = \left(2.000 \frac{rev}{min} \right) \left(14,5 \frac{cm^3}{rev} \right) \left(\frac{1 m^3}{10^6 cm^3} \right) \left(\frac{60 min}{1 h} \right) \rho(160^\circ C, 350 kPa, fluido) \quad (\text{Ec. 2})$$

El fluido de trabajo transformó parte de su energía interna en energía mecánica durante un proceso de expansión politrópica y el vapor agotado salió del expansor a presión de condensación.

El vapor agotado ingresó al condensador para salir como líquido subenfriado, con una temperatura de 34°C y una presión de saturación correspondiente a 44°C, lo que asegura un subenfriamiento adecuado de 10 K (Landelle et al., 2017). En este proceso no se consideraron caídas de presión dentro del intercambiador de calor.

Como fluido de enfriamiento se empleó agua, que ingresó al condensador a condiciones ambientales (89,925 kPa y 24°C para Bucaramanga, Santander) (Clima.com, 2024; Meteoprog.com, 2024; Weather Spark, 2024b) y salió del proceso con una temperatura inferior a 40°C para cumplir con la normativa ambiental (Ministerio de Ambiente, 2008).

Finalmente, el fluido de trabajo ingresó a la bomba, donde alcanzó nuevamente la presión inicial, con una eficiencia isentrópica del 75% (Landelle et al., 2017).

4.2.4. Parámetro para evaluar el rendimiento del biogás

El rendimiento del biogás ($R_{Biogás}$) (Ec. 3) fue evaluado como la proporción entre la energía calórica de la combustión y el volumen de biogás suministrado para cada composición seleccionada.

$$R_{Biogás} = \frac{\text{Calor Obtenido de la Combustión}}{\text{Volumen de Gas Suministrado}} \quad (\text{Ec. 3})$$

4.2.5. Parámetros para evaluar el desempeño del COR

Para evaluar el desempeño del COR en el primer objetivo, se seleccionaron dos parámetros: la eficiencia térmica (Ec. 1) y el rendimiento del ciclo (R)(Ec. 4). El rendimiento del ciclo fue evaluado como la proporción entre la potencia obtenida y el volumen de biogás suministrado.

$$R = \frac{\text{Potencia Obtenida del COR}}{\text{Volumen de Gas Suministrado}} \quad (\text{Ec. 4})$$

4.3. Etapa 3: Simulación COR para un caso de aplicación en Villa Porkinos

4.3.1. Descripción del caso de estudio en Villa Porkinos

Villa Porkinos se encuentra ubicada en la zona rural municipio de Lebrija, Colombia. El clima de esta región es tropical y se encuentra a una altura de 1.055 msnm (Alcaldía Municipal de Lebrija, 2024), con una temperatura entre 20°C y 26°C. La granja cuenta con aproximadamente 2.300 cerdos y 16 digestores anaerobios de 40 m³ cada uno, que en conjunto generan 128 m³/día de biogás, con una composición promedio de 71.83 de CH₄ y 28.17% molar de CO₂.

4.3.2. Simulación a las condiciones de Villa Porkinos

Se planteó como alternativa el uso del COR para aprovechar el calor residual generado en la granja a partir del biogás producido y su respectiva composición. Se comparó la configuración estándar del COR, considerado el mejor diseño en términos termodinámicos y económicos, y el CORR, que tiene el potencial de cogeneración y de aumentar la eficiencia en una pequeña proporción (Landelle et al., 2017; Lecompte et al., 2015a; Peris et al., 2013). El flujo másico del fluido de trabajo se determinó a partir de las condiciones de entrada al expansor y de acuerdo con la temperatura de salida de los gases de combustión.

4.3.2.1. Simulación COR para Villa Porkinos. La simulación del COR para Villa Porkinos empleó las mismas consideraciones del primer objetivo. La combustión del biogás se desarrolló con un exceso de aire del 21%, los gases de combustión aumentaron la temperatura del fluido de trabajo con una eficiencia del 83% y salieron del proceso a 200°C. El fluido de trabajo entró al expansor bajo las condiciones recomendadas por la literatura para cada fluido y fue sometido a un proceso de expansión politrópica. El vapor agotado salió a la presión de condensación e ingresó al condensador.

El fluido de trabajo salió del condensador como líquido subenfriado a condiciones de saturación, asegurando un subenfriamiento de 10 K. El agua de enfriamiento ingresó al condensador a condiciones ambientales (89,925 kPa y 22°C para Lebrija, Santander) (Meteoprog.com, 2024; Weather Spark, 2024a, 2024b) y salió del proceso a una temperatura inferior a 40°C. Se despreciaron las caídas de presión dentro del intercambiador.

4.3.2.2. Simulación CORR para Villa Porkinos. Las etapas y condiciones del COR se repitieron para el CORR con la adición de la etapa del regenerador. En la etapa del regenerador, el vapor agotado a presión de condensación ingresó al regenerador, donde transfirió su calor al líquido subenfriado que se dirige al expansor. Este intercambio de calor permitió precalentar el fluido de trabajo antes de la entrada al expansor, aprovechando la energía residual del vapor.

4.3.2.3. Parámetro para evaluar energía producida (Wh). El parámetro para evaluar el desempeño del COR y el CORR en el caso de estudio de Villa Porkinos fue la potencia en W durante una hora de funcionamiento del equipo, lo que se tradujo en vatios-hora (Wh) al considerar que 1 W equivale a 1 Wh por cada hora de operación.

5. Resultados

5.1. Etapa 1: Revisión bibliográfica

5.1.1. Selección de los fluidos de trabajo

Se seleccionaron fluidos de trabajo (tabla 2) de diferente naturaleza (apéndice D) para evaluar su efecto en la eficiencia del COR. Los refrigerantes R-123 y R-245fa fueron elegidos debido a sus bajos valores de PAO y PCG en comparación con otros de su grupo. Además,

presentan un bajo riesgo en términos de seguridad y son ampliamente reconocidos a nivel mundial tanto en plantas de generación de energía como en estudios académicos (Bao & Zhao, 2013).

El etanol fue seleccionado por ser un fluido no tóxico con buena eficiencia, habiendo sido ampliamente estudiado para el COR en aplicaciones móviles, e incluso probado en un prototipo. Su bajo costo lo convierte en una opción atractiva (Lion et al., 2017; Preißinger et al., 2017).

Finalmente, el agua, a pesar de no ser un fluido orgánico, se incluyó para comparar su desempeño con respecto a los fluidos mencionados anteriormente debido a su alta disponibilidad en las zonas rurales y seguridad.

Tabla 2

Propiedades de los fluidos de trabajo a analizar en el desempeño del COR

Fluido de trabajo	Propiedades físicas			Datos de seguridad		Impacto ambiental			Precio (COP/kg)
	Teb ^a (°C)	Tcrit ^b (°C)	Pcrit ^c (MPa)	Toxicidad	Inflamabilidad	TVA ^d (años)	PAO ^e	PCG ^f	
R123	27,8	183,7	3,668	Baja	Baja	1,3	0,02	77	181.000
R245fa	15,3	154,1	3,64	Baja	Baja	7,6	0	950	99.873
Etanol	78,4	240,8	6,148	-	Sí	-	-	-	5.321 ^g
Agua	100	374,1	22,064	-	No	-	-	<1	28.411

Nomenclatura: **a.** Temperatura normal de ebullición **b.** Temperatura crítica **c.** Presión crítica **d.** Tiempo de vida en la atmósfera **e.** Potencial de deterioro de la capa de ozono, comparado con el R11 **f.** Potencial de calentamiento global, comparado con el CO₂ **g.** Precio dado para un etanol con pureza del 96%.

Nota. Adaptado de (EXPRESS CHEMS, 2024; GASSERVEI, n.d.; Honeywell International Inc, 2024; Indiamart, 2024b, 2024a; Masheiti et al., 2011; Preißinger et al., 2017; Shandong Qibo New Energy Co Ltd., 2024; Super Sonic Industries, 2024; Tchanche et al., 2009)

5.1.2. Selección del software

Se seleccionó el software Aspen Plus V.14, ya que incluye las ecuaciones de balance necesarias para el modelado 0-D (modelo cero-dimensional), ofrece acceso a una amplia gama de bibliotecas y dispone de los fluidos requeridos para la simulación, a comparación de MATLAB, EES y Aspen Hysys. Otra ventaja, fue la gran variedad de paquetes termodinámicos disponibles.

El paquete termodinámico seleccionado fue REFPROP, una base de datos desarrollada por el *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Esta base de datos proporciona información precisa sobre las propiedades termodinámicas y de transporte de fluidos clave para la industria (Aspen Plus V.14, n.d.). En este caso, REFPROP incluye todas las sustancias necesarias para modelar utilizando ecuaciones de estado explícitas basadas en la energía de Helmholtz y la ecuación modificada de Benedict-Webb-Rubin, empleada para representar el R-123 cumpliendo con los rangos de aplicación establecidos (apéndice F).

5.2. Etapa 2: Evaluación del tipo de fluido de trabajo y composición del biogás

5.2.1. Definición del contenido de metano del del biogás a utilizar

De manera general, se llevó a cabo la caracterización del biogás producido en 30 biodigestores instalados en granjas, operando a diferentes temperaturas y utilizando como materia prima estiércol vacuno, porcino y gallinaza con el fin de representar un biogás estándar (apéndice E). Los resultados se observan en la tabla 3.

Tabla 3

Resultados y definición de la composición del biogás

Compuesto	Literatura		Categorías Definidas		
	Mínimo	Máximo	Baja	Media	Alta
CH ₄	43,5%	69,2%	45%	55%	65%
CO ₂	56,5%	30,8%	55%	45%	35%

Con la selección de los fluidos de trabajo y el contenido de metano del biogás que se van a implementar, se estableció la matriz de diseño para la simulación de los dos objetivos (tabla 4).

Tabla 4

Matriz de diseño para la simulación del COR

Objetivo 1	Variable Entrada	Valor	Variable Salida	Objetivo 2	Config. Ciclo	Valor V. Entrada	Variable Salida
	Calidad del Biogás	45% CH ₄ 55% CH ₄ 65% CH ₄	$R_{Biogás}$			COR	$\frac{f(agua)}{f(etanol)}$ $\frac{f(R123)}{f(R245fa)}$
Fluido de Trabajo	$\frac{f(agua)}{f(etanol)}$ $\frac{f(R123)}{f(R245fa)}$	η y R		CORR	$\frac{f(agua)}{f(etanol)}$ $\frac{f(R123)}{f(R245fa)}$		Wh

5.2.2. Selección de la eficiencia del expansor

La eficiencia del expansor se seleccionó a partir de una base experimental. Se consultaron eficiencias de expansores similares que fueron reportadas en la literatura (tabla 5)

Tabla 5

Eficiencias experimentales de turbinas tipo expansor en la literatura

Investigador(es)	Fluido de Trabajo	η Eficiencia (%)	Potencia (kW)	Velocidad de Rotación (rpm)
Wu et al. (2015)	R123	40	-	1.965
Airsquared (2018)	R245fa	45	-	2.000
(Aoun et al., 2008)	Agua	48	-	2.000
(Galindo et al., 2016)	Etanol	50,68	1,739	2.000

5.2.3. Simulación del COR a condiciones del expansor E15H022A-SH

Se establecieron 2.000 RPM que se utilizaron para estimar el flujo másico (m) mediante la Ec. 2. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.

Tabla 6

Flujo másico a partir de la naturaleza del fluido de trabajo

Fluido de trabajo	Densidad (kg/m ³)	Flujo másico (kg/h)
Agua	1,80	3,13
Etanol	4,66	8,12
R123	15,49	26,96
R245fa	13,43	23,38

Nota. La densidad fue tomada a una presión de 350 kPa y 160°C utilizando el análisis de sustancia pura de Aspen Plus V.14 (Apéndice F)

El primer objetivo consistió en evaluar el Ciclo Orgánico de Rankine utilizando las restricciones operacionales del expansor E15H022A-SH del prototipo de máquina térmica, la configuración del COR se observa en la figura 6, las suposiciones se encuentran en la tabla 7 y las condiciones de operación se encuentran en la tabla 8.

Figura 6

Diagrama del COR a condiciones del expansor E15H022A-SH

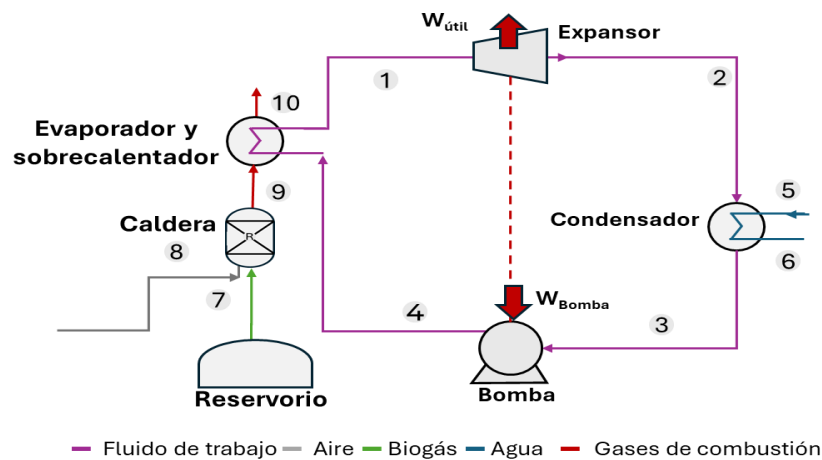


Tabla 7

Suposiciones por etapa para COR a condiciones del expansor E15H022A-SH

Etapa	Unidad de operación	Suposiciones
Condensación (5-6)	C= Condensador	-Condiciones ambientales de entrada (24°C y 89,925 kPa ^c) con temperatura de salida $T_6 = T_3 - 5K < 40^\circ C^d$ y presión constante
Reacción de combustión (7-8)	R= Quemador	-Combustión y conversión completa, aire seco a 21% ^a de exceso y biogás sin presencia de H ₂ S
Evaporación y sobrecalentamiento (10-11)	E= Evaporador y sobrecalentador	-Eficiencia del proceso de transferencia de calor es 83% con ayuda del multiplicador (Apéndice F). -Temperatura de emisión de los gases de chimenea de 200°C ^b y sin caídas de presión

Nota. Adaptado de: a. (Hosseini & Wahid, 2013) b (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). c. (Clima.com, 2024; Meteoprog.com, 2024; Weather Spark, 2024) d. (Ministerio de Ambiente, 2008)

Tabla 8

Condiciones de operación para COR según requerimientos del expansor E15H022A-SH

Sustancia	Evaporación y sobrecalentamiento (6-1)	Expansión (1-2)	Condensación (2-3) *	Bombeo (3-4)
Etanol		$\eta = 0,51$ $P_2 = P_3$		
R123	$T_1 = 160^\circ C$ $P_1 = 350 \text{ kPa}$	$\eta = 0,40$ $P_2 = P_3$	$P_4 = P_{\text{sat}} (44C)$ $T_4 = 34^\circ C$	$P_4 = P_5 = P_6$ $\eta_{\text{iseb}} = 75\%$
R245fa		$\eta = 0,45$ $P_2 = P_3$		
Agua		$\eta = 0,48$ $P_2 = P_3$		

Nota. η_{iseb} : Eficiencia isentrópica de la bomba (%) *Se considera un subenfriamiento de 10 K (Landelle et al., 2017).

A las condiciones del expansor E15H022A-SH se obtuvieron los resultados de la tabla 9. Cabe resaltar que, debido a las restricciones del expansor, las condiciones del fluido de trabajo se mantuvieron constantes para cumplir con los límites de la unidad de proceso. Sin un cambio en las condiciones del fluido de trabajo, se tuvo como consecuencia que los resultados para potencia producida (W_h) y eficiencia térmica (η_T) dependieron exclusivamente del tipo de fluido de trabajo y no de la composición del biogás.

Las variables de salida que presentaron cambios respecto a la calidad del biogás fueron el flujo de biogás (Q), el rendimiento del biogás ($R_{biogás}$) y el rendimiento del ciclo (R).

Tabla 9

Resultados de simulación del COR a condiciones del expansor E15H022A-SH

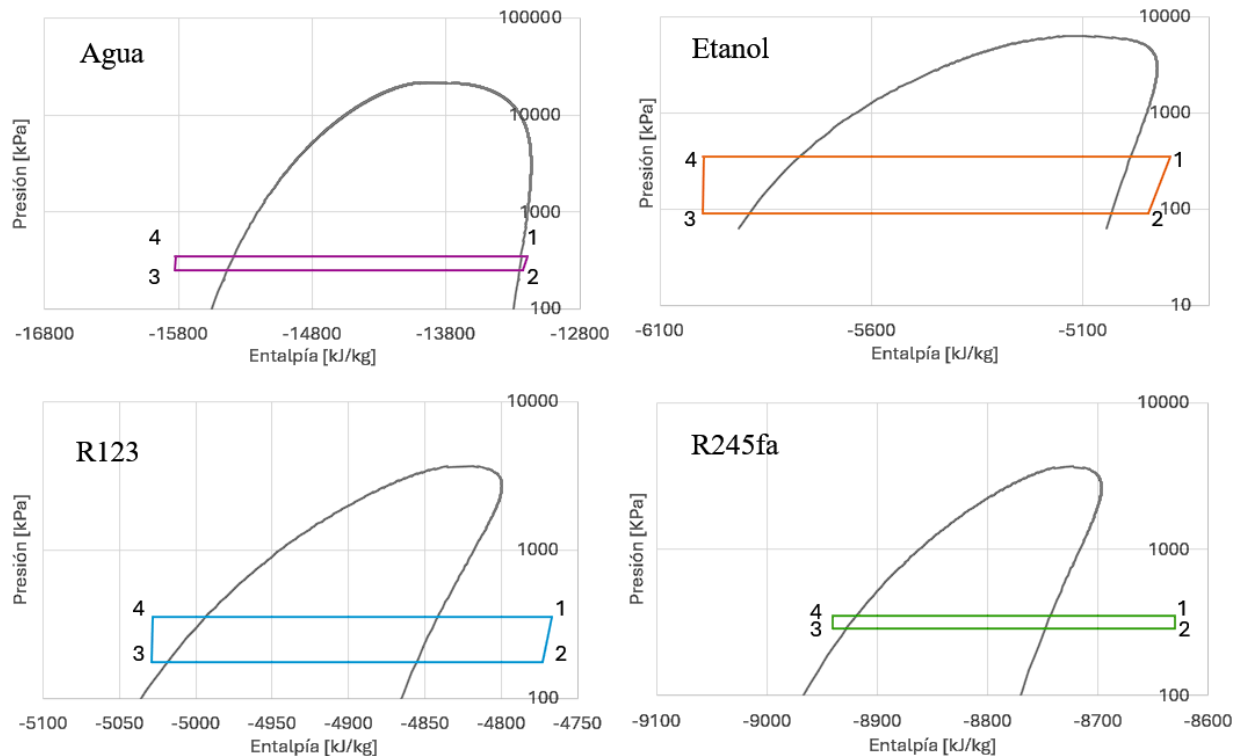
Fluido de trabajo	Metano en el biogás (%v/v)	Q (m ³ /h) Flujo de biogás	R _{biogás} * (Wh/m ³) Rendimiento del biogás	R** (Wh/m ³) Rendimiento del ciclo	Potencia Producida (Wh)	η_T *** (%) Eficiencia térmica
Etanol	45	0,91	2.746,2	125,5	113	4,5
	55	0,74	3.367,8	153,9		
	65	0,63	3.992	182,4		
Agua	45	0,83	2.746	31,2	25,88	1,1
	55	0,68	3.368,5	38,2		
	65	0,57	3.989,8	45,3		
R123	45	0,71	2.745,5	64,5	45	2,3
	55	0,58	3.367,7	79,1		
	65	0,49	3.990,2	93,7		
R245fa	45	0,74	2.746	21,6	15	0,7
	55	0,60	3.369	26,5		
	65	0,51	3.991	31,4		

Nota. * Definido en la ecuación 3 ** Definido en la ecuación 4 *** Definida en la ecuación 1.

En lo que respecta a los fluidos húmedos, se observó que el agua (figura 7A) presenta muchas limitaciones debido a su naturaleza. En este caso específico, la presión de saturación del agua a 44°C para el proceso de condensación es inferior a la atmosférica (8,2095 kPa). Por lo tanto, se tomó la presión de expansión 251 kPa con el fin de garantizar una expansión segura y evitar la formación de gotas en el expansor. A pesar de la naturaleza húmeda del etanol (figura 7B) y que su flujo es inferior comparado con los refrigerantes, fue el fluido con mejor rendimiento del ciclo.

Figura 7

Diagrama presión entalpía para los fluidos de trabajo



Los refrigerantes (figura 7C y 7D) presentaron una eficiencia baja asociada al limitado rango de expansión, entraron a 350 kPa mientras que lo utilizado normalmente en la literatura es de 1.200 kPa. Finalmente, el sobrecalentamiento de los refrigerantes (160°C) respecto a sus

óptimos 122°C y 125°C para el R245fa y R123 terminan de disminuir la eficiencia(Zhang et al., 2019). Debido a la baja eficiencia de los refrigerantes a las condiciones del COR para el expansor E15H022A-SH, se llevó a cabo un ejercicio adicional en el que se consideraron las condiciones recomendadas por literatura y válidas según las limitaciones del expansor (tabla 10).

Tabla 10

Condiciones de los refrigerantes para COR a condiciones optimizadas

Sustancia	Evaporación y sobrecalentamiento (4-1)	Expansión (1-2)	Condensación (2-3) *	Bombeo (3-4)
R123	T ₁ =125°C P ₁ =1.200 kPa	η=0,4 P ₂ =P ₃	P ₃ =P _{sat} (43) T ₃ =33°C	P ₄ =P ₁ η _{jseb} =75%
R245fa	T ₁ =122°C P ₁ =1.200kPa	η=0,45 P ₂ =P ₃	P ₃ =P _{sat} (37) T ₃ =27°C	

Nota. Las condiciones tomadas de la entrada del expansor corresponden de (Zhang et al., 2019)

El COR a condiciones optimizadas arroja los resultados de la tabla 11 y la figura 8.

Tabla 11

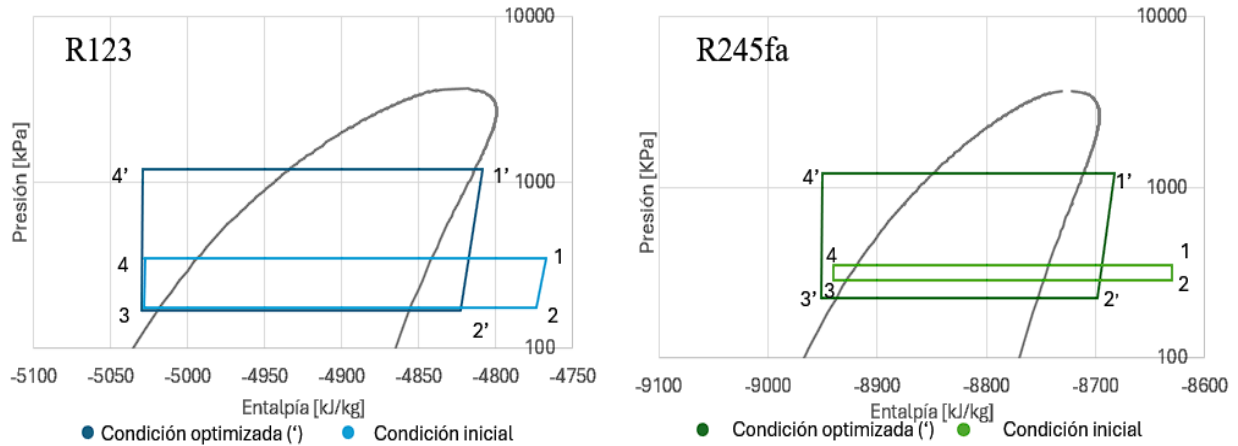
Resultados de simulación del COR para los refrigerantes a condiciones optimizadas

Fluido	Metano en el biogás (%v/v)	Q (m ³ /h) Flujo de biogás	Rbiogás* (Wh/m ³) Rendimiento del biogás	R** (Wh/m ³) Rendimiento del ciclo	Potencia Producida (Wh)	η _r *** (%) Eficiencia térmica
R123	45	0,60	2.744,8	178,2	100	6,1
	55	0,49	3.366,7	218,6		
	65	0,41	3.989,1	259,0		
R245fa	45	0,63	2.746,2	164,0	98	5,6
	55	0,52	3.368,7	201,7		
	65	0,44	3.991,2	238,9		

Nota. * Definido en la ecuación 3 ** Definido en la ecuación 4 *** Definida en la ecuación 1.

Figura 8

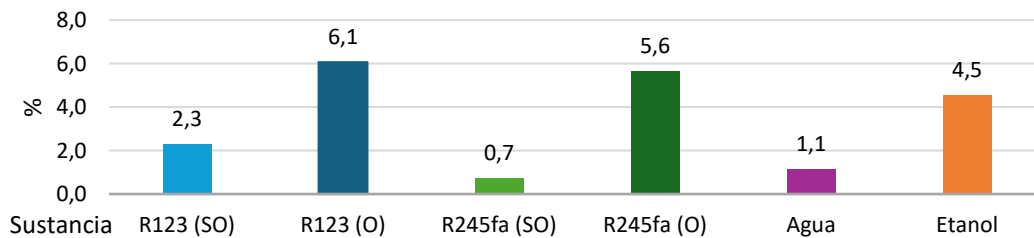
Diagrama Entalpía-Presión de los refrigerantes a condiciones óptimas e iniciales



Se observa que los resultados a condiciones optimizadas se ajustan con el rango convencional de estos fluidos 3 - 21,14% para el R123 (Feng et al., 2017; Pei et al., 2011; Surindra et al., 2019; Yağlı et al., 2021; X. Zhang et al., 2019) y 5 - 9% para el R245fa (Feng et al., 2017; Galloni et al., 2015; Giuffrida, 2018; Muhammad et al., 2015). Los fluidos que más se destacan son el R245fa, con eficiencia de 5,6% y energía producida de 98 W, y el R123 a condiciones optimizadas, con eficiencia de 6,1% y energía producida de 100 W, como se observa en las figuras 9 y 10, respectivamente.

Figura 9

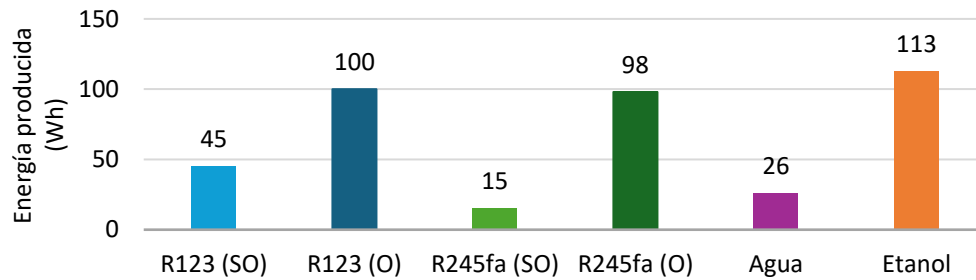
Eficiencia del COR para todos los fluidos de trabajo



Nota. SO: Sin optimizar O: Optimizado

Figura 10

Energía producida respecto todos los fluidos de trabajo



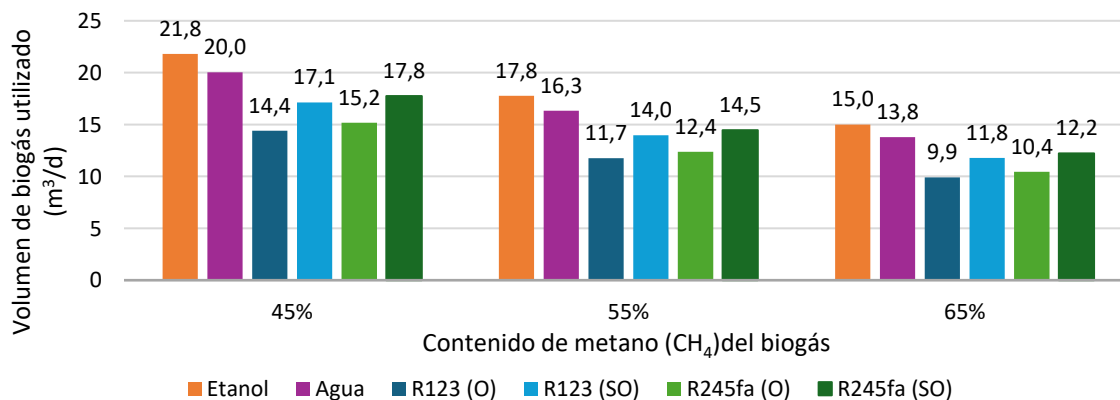
Nota. SO: Sin optimizar O: Optimizado

5.2.4. Efecto de la calidad del biogás en el Ciclo Orgánico de Rankine

De acuerdo con lo que se observa en la figura 11 y 12, la calidad del biogás es inversamente proporcional al flujo volumétrico requerido, dado que el ciclo está configurado para mantener constante el flujo másico del fluido de trabajo.

Figura 11

COR respecto a la calidad del biogás por fluido de trabajo

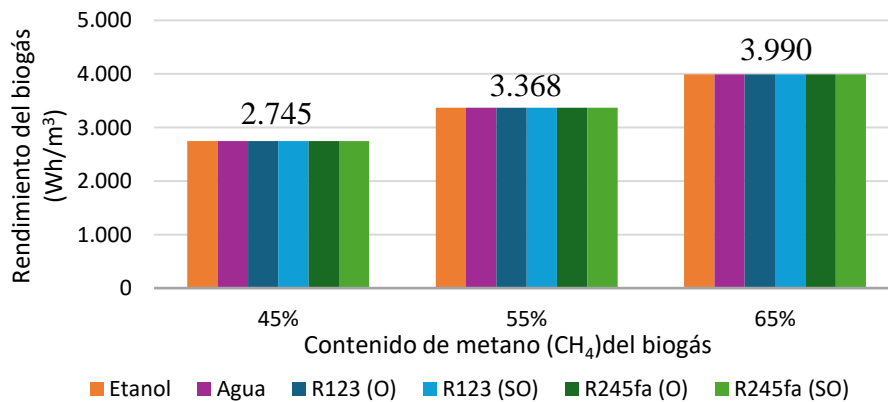


Nota. SO: Sin optimizar O: Optimizado

Para los fluidos húmedos el consumo de biogás es superior, asociado a tener una capacidad calorífica elevada de 1,865 kJ/kg K y 1,437 kJ/kg K, para el agua y el etanol, respectivamente. Por otro lado, en los refrigerantes se observa un menor consumo, asociado a 0,687 kJ/kg K para el R123 y 0,878 kJ/kg K para el R245fa.

Figura 12

Rendimiento del biogás a las calidades seleccionadas



Nota. SO: Sin optimizar O: Optimizado

La influencia en la eficiencia térmica del COR es de manera indirecta, ya que esta está relacionada fuertemente con la escala (flujo másico) y la eficiencia del expansor (Landelle et al., 2017). Aunque en este trabajo no se evidencia de manera directa, se puede inferir que el tener un biogás con mayor calidad se relaciona a tener mayor disponibilidad de energía calórica que permitirá un aumento de la eficiencia del ciclo.

5.3. Etapa 3: Simulación COR para un caso de aplicación en Villa Porkinos

5.3.1. Simulación a las condiciones de Villa Porkinos

En el segundo objetivo se evaluó el COR como alternativa para el aprovechamiento de los gases de combustión en el caso de estudio en Villa Porkinos. Se planteó un COR y un CORR con el fin de observar sus efectos en la eficiencia del ciclo, además de considerar las condiciones óptimas para cada uno de los fluidos encontrada en literatura y con el biogás caracterizado (71.83 de CH_4 y 28.17% molar de CO_2). La configuración del COR se observa en la figura 13 y las condiciones de operación se encuentran en la tabla 12.

Figura 13

Diagrama del COR a condiciones de Villa Porkinos

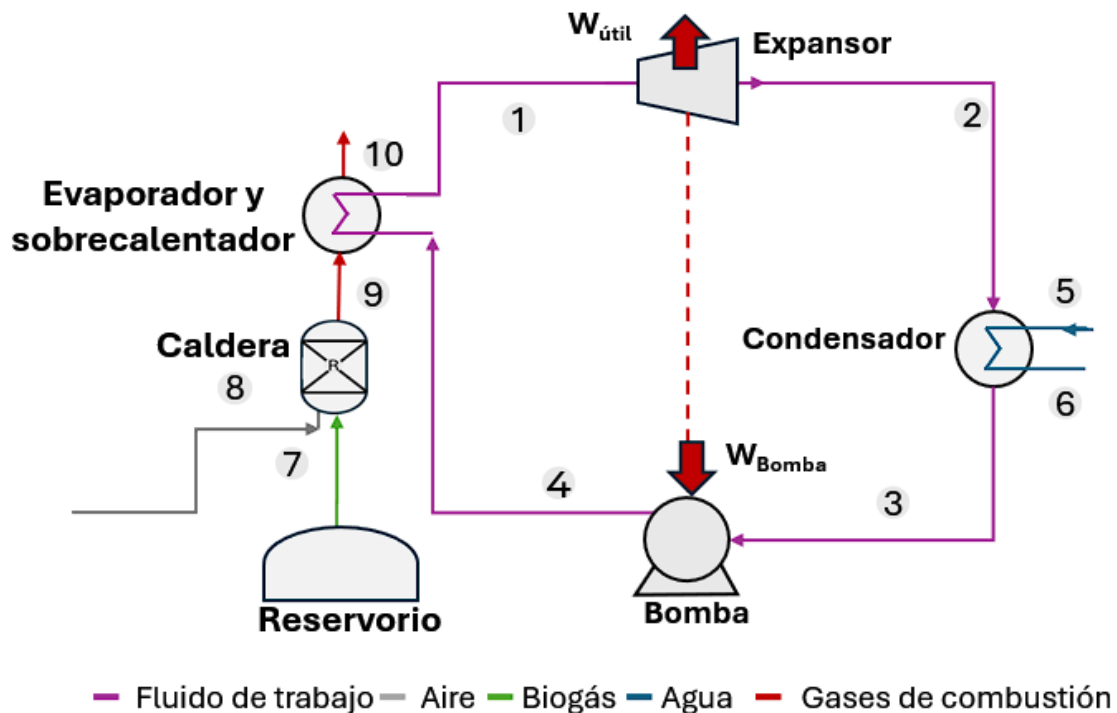


Tabla 12

Condiciones por sustancia para COR a condiciones de Villa Porkinos

Sustancia	Evaporación y sobrecalentamiento (4-1)	Expansión (1-2)	Condensación (2-3)*	Bombeo (3-4)
Etanol	$T_1 = 215^\circ\text{C}$ $P_1 = 1.200\text{kPa}$	$\eta_t = 0,51$ $P_2 = P_3$	$P_3 = P_{\text{sat}} (90)$ $T_3 = 80^\circ\text{C}$	
R123	$T_1 = 125^\circ\text{C}$ $P_1 = 1.200\text{ kPa}$	$\eta_t = 0,40$ $P_2 = P_3$	$P_3 = P_{\text{sat}} (43)$ $T_3 = 33^\circ\text{C}$	$P_4 = P_1$ $\eta_{\text{jseb}} = 75\%$
R245fa	$T_1 = 122^\circ\text{C}$ $P_1 = 1.200\text{kPa}$	$\eta_t = 0,45$ $P_2 = P_3$	$P_3 = P_{\text{sat}} (37)$ $T_3 = 27^\circ\text{C}$	
Agua	$T_1 = 440^\circ\text{C}$ $P_1 = 1.200\text{kPa}$	$\eta_t = 0,48$ $P_2 = P_3$	$P_3 = P_{\text{sat}} (160)$ $T_3 = 150^\circ\text{C}$	

Nota. η_{jseb} : Eficiencia isentrópica de la bomba (%) *Se considera un subenfriamiento de 10 K (Landelle et al., 2017) ** Se tomaron en cuenta

La configuración del CORR se observa en la figura 14, las condiciones de operación se encuentran en la tabla 13.

Figura 14

Diagrama del CORR a condiciones de Villa Porkinos

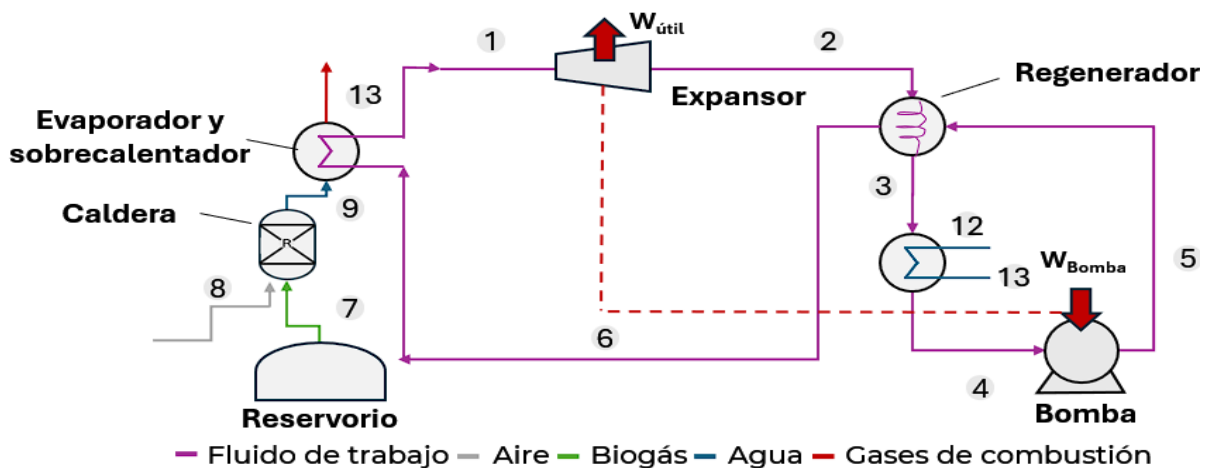


Tabla 13*Condiciones por sustancia para CORR a condiciones de Villa Porkinos*

Sustancia	Evaporación y sobrecalentamiento (6-1)	Expansión (1-2)	Regenerador (2-3)	Condensación (3-4) *	Bombeo (4-5)
Etanol ^a	T ₁ = 215°C P ₁ =1.200kPa	η _c =0,51 P ₂ =P ₃		P ₄ =Psat (90) T ₄ =80°C	
R123 ^b	T ₁ = 125°C P ₁ =1.200 kPa	η _c =0,40 P ₂ =P ₃	P ₃ =P ₄	P ₄ =Psat (43) T ₄ =33°C	P ₄ =P ₅ =P ₆ η _{iseb} =75%
R245fa ^c	T ₁ = 122°C P ₁ =1.200kPa	η _c =0,45 P ₂ =P ₃	T ₃ =T ₅ +10K**	P ₄ =Psat (37) T ₄ =27°C	
Agua ^d	T ₁ = 440°C P ₁ =1.200kPa	η _c =0,48 P ₂ =P ₃		P ₄ =Psat (160) T ₄ =150°C	

Nota. η_{iseb}: Eficiencia isentrópica de la bomba (%) *Se considera un subenfriamiento de 10K (Landelle et al., 2017) ** En la estructura con regenerador, la literatura recomienda un pinch point de al menos 5K (Braumakis & Karellas, 2018). Se estableció que la temperatura de salida de la corriente caliente (3) es 10K mayor que la de la corriente fría de entrada (5). Condiciones tomadas de: ^a. (Amicabile et al., 2015; Galindo et al., 2016; Nelson, 2015) ^{b, c}. (Bu et al., 2013; Feng et al., 2017; Galloni et al., 2015; Giuffrida, 2018; Kang, 2012; L. Li et al., 2017; M. Li et al., 2013; Muhammad et al., 2015; Pang et al., 2017; Pei et al., 2011; Shao et al., 2017; Surindra et al., 2019; Touaibi et al., 2020; Yağlı et al., 2021) ^d. (Luyben, 2023; Raab et al., 2021).

5.3.2. Resultados para la simulación del COR y CORR

El COR a las condiciones de Villa Porkinos arroja los resultados de la tabla 14 y el CORR arroja los resultados de la tabla 15. En las figuras 15 y 16 se realiza la comparativa del efecto del regenerador en la energía producida y en la eficiencia del ciclo.

Tabla 14*Resultados de simulación del COR a condiciones de Villa Porkinos*

Fluido de Trabajo	Potencia Producida (kWh)	η_T (%) Eficiencia Térmica	R Rendimiento del Ciclo (kW/m³)
Agua	0,874	3,65	0,164
Etanol	1,811	7,46	0,339
R123	1,574	6,00	0,295
R245fa	1,423	5,63	0,266

Nota. * Definido en la ecuación 3 ** Definido en la ecuación 4 *** Definida en la ecuación 1.

Tabla 15*Resultados de simulación del CORR a condiciones de Villa Porkinos*

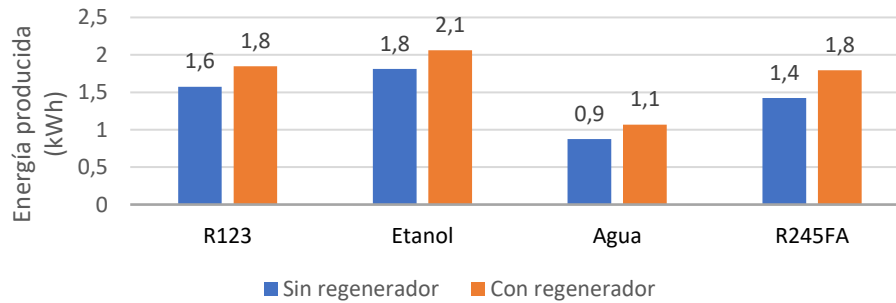
Fluido de Trabajo	Potencia Producida (kWh)	η_T (%) Eficiencia Térmica	R Rendimiento del Ciclo (kW/m³)
Agua	1,066	4,46	0,199
Etanol	2,062	8,50	0,386
R123	1,846	7,09	0,346
R245fa	1,795	7,14	0,336

Nota. * Definido en la ecuación 3 ** Definido en la ecuación 4 *** Definida en la ecuación 1.

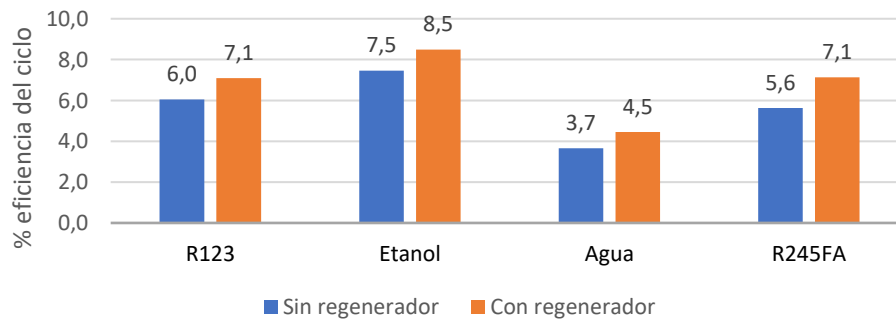
El fluido que tiene mejor desempeño para esta gran escala corresponde al etanol, con una producción de energía de 1,8 kWh (COR) y 2,1 kWh (CORR) y una eficiencia de 7,5% (COR) a 8,5% (CORR), como se observa en las figuras 15 y 16, respectivamente.

Figura 15

Efecto del regenerador en la energía producida respecto al fluido de trabajo

**Figura 16**

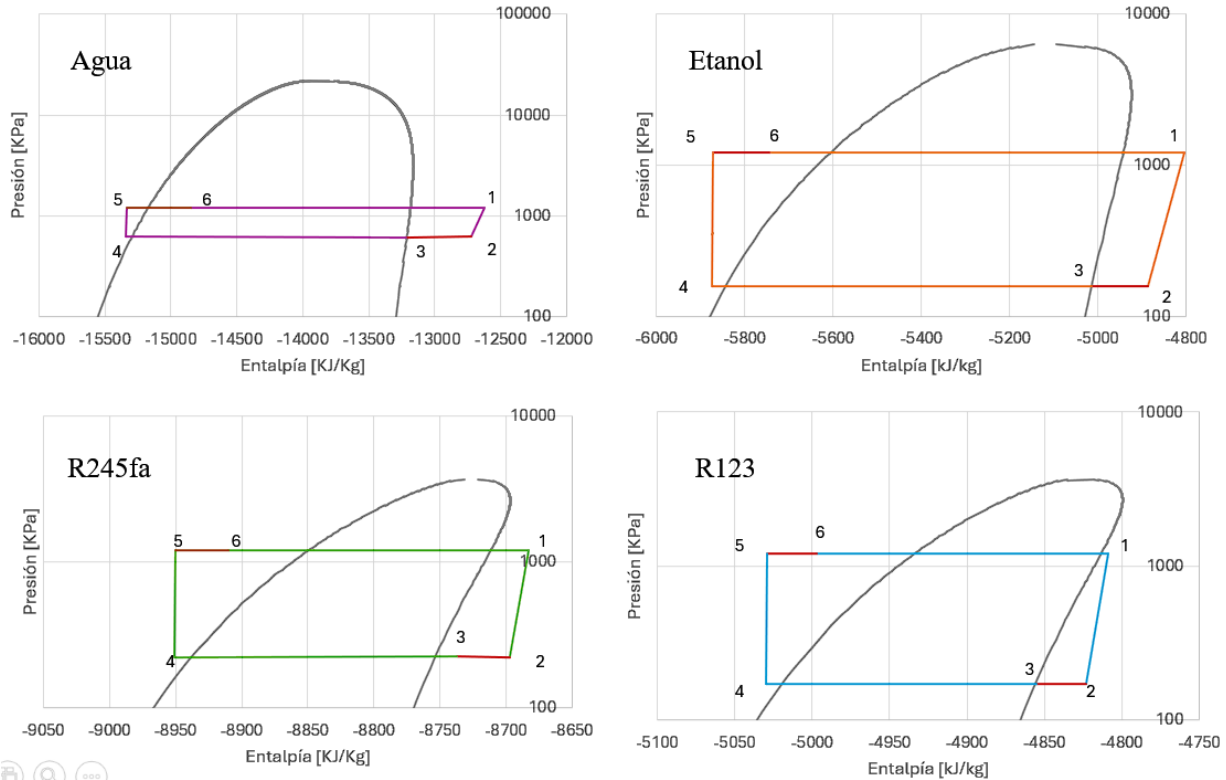
Efecto del regenerador en la eficiencia del ciclo respecto al fluido de trabajo



La línea resaltada en rojo en la figura 17 A, B, C y D corresponde a la energía que el regenerador permite remover (corrientes 2 a 3), posterior a la etapa de expansión, y suministrar (corrientes 5 a 6), previo a la etapa de evaporación.

Figura 17

Diagrama de presión entalpía para los fluidos de trabajo



6. Conclusiones

Para procesos de bajas temperaturas de evaporación, como el del prototipo de máquina térmica de la Escuela de Ingeniería Química, los refrigerantes R123 y R245fa son altamente recomendables como fluidos de trabajo, debido a su buen desempeño en rangos de temperatura reducidos, alcanzando eficiencias de 5% y 6,1%, respectivamente. Aunque el agua es una alternativa de bajo costo y fácil acceso para su uso en el prototipo, su aplicación no es viable debido a las limitaciones en la expansión y al riesgo de formación de gotas durante este proceso. La baja

temperatura de entrada al expansor (160°C) reduce significativamente la eficiencia térmica en comparación con otros fluidos (1,1%).

El rendimiento calórico y el volumen requerido de biogás son variables que dependen de la calidad del biogás. A mayor contenido de metano, se obtiene un mayor poder calorífico con un menor volumen de biogás. En el diseño del COR, la calidad del biogás se puede correlacionar con la eficiencia a través del calor suministrado en el evaporador. A medida que aumenta la calidad del biogás, también lo hace el calor transferido en el evaporador, lo que incrementa la energía contenida en el fluido de trabajo que ingresa sobrecalentado al expansor.

En el caso de aplicaciones energéticas a gran escala con disponibilidad de biogás, como en Villa Porkinos, el etanol se presenta como una alternativa destacada, ya que ofrece un mayor rendimiento por metro cúbico de biogás (0,34 kWh en el COR y 0,38 kWh en el CORR) para la conversión de energía térmica en eléctrica. Además, la incorporación de un regenerador al COR incrementó la energía producida y mejoró la eficiencia térmica para todos los fluidos. En particular, el R245fa logró una producción adicional de 0,4 kWh y aumentó su eficiencia del 5,6 % sin regenerador al 7,1 % con regenerador.

7. Recomendaciones

Se sugiere considerar el uso de una mezcla de etanol y agua como fluido de trabajo, dado que el etanol, aunque inflamable, puede tener su inflamabilidad mitigada mediante la mezcla con agua. Esta estrategia no solo reduce el riesgo de inflamabilidad, sino que también podría optimizar el rendimiento del ciclo.

Para poder implementar al etanol como alternativa es necesario realizar estudios de tasas de dilución, ya que, aunque el etanol presenta un comportamiento teórico excelente, su concentración debe ser controlada para evitar daños en los equipos.

Existen alternativas de refrigerantes con un potencial de calentamiento global y deterioro de la capa de ozono casi nulos, aunque todavía están en fase preliminar de estudio como reemplazo de los refrigerantes convencionales. Realizar un proyecto de investigación simulando estos nuevos refrigerantes podría ayudar a identificar mejores alternativas, así como un análisis de costos para determinar su viabilidad económica.

Referencias Bibliográficas

- Ahlberg-Eliasson, K., Nadeau, E., Levén, L., & Schnürer, A. (2017). Production efficiency of Swedish farm-scale biogas plants. *Biomass and Bioenergy*, 97, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.002>
- Airsquared. (2018). *E15H022A-SH 1 kW Semi-Hermetic Scroll Expander*.
- Alcaldía Municipal de Lebrija. (2024, September 13). *Información del Municipio*. <https://www.lebrija-santander.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- Allegue, L. B., Hinge, J., & Allé, K. (2012). *Biogas and bio-syngas upgrading*.
- Amicabile, S., Lee, J. I., & Kum, D. (2015). A comprehensive design methodology of organic Rankine cycles for the waste heat recovery of automotive heavy-duty diesel engines. *Applied Thermal Engineering*, 87, 574–585. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.034>
- Anastasovski, A., Rasković, P., & Guzović, Z. (2020). A review of heat integration approaches for organic rankine cycle with waste heat in production processes. *Energy Conversion and Management*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113175>
- Aoun, B., Clodic, D. F., & Clodic, D. (2008). Theoretical and Experimental Study of an Oil-Free Scroll Vapor Expander. *International Compressor Engineering Conference at Purdue*. <https://docs.lib.purdue.edu/icec>
- Aspen Plus V.14. (n.d.). *REFPROP (NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database)*.
- Bacenetti, J., Fusi, A., & Azapagic, A. (2019). Environmental sustainability of integrating the organic Rankin cycle with anaerobic digestion and combined heat and power generation.

Science of the Total Environment, 658, 684–696.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.190>

Bao, J., & Zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 24, pp. 325–342).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.040>

Bu, X., Wang, L., & Li, H. (2013). Performance analysis and working fluid selection for geothermal energy-powered organic Rankine-vapor compression air conditioning. *Geothermal Energy*, 1(1). <https://doi.org/10.1186/2195-9706-1-2>

Clima.com. (2024, August 16). *El tiempo en Lebrija, Lebrija hoy - Temperatura a 14 días*.
<https://www.clima.com/colombia/santander/lebrija>

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>

Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources*. WILEY-VCH.

EXPRESS CHEMS. (2024). *Distilled Water 100ml to 100 Litres*.
<https://expresschems.co.uk/products/distilled-water?variant=40803283206343>

Feng, Y. qiang, Hung, T. C., He, Y. L., Wang, Q., Wang, S., Li, B. xi, Lin, J. R., & Zhang, W. (2017). Operation characteristic and performance comparison of organic Rankine cycle (ORC) for low-grade waste heat using R245fa, R123 and their mixtures. *Energy Conversion and Management*, 144, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.048>

- Ferrer, I., Garfí, M., Uggetti, E., Ferrer-Martí, L., Calderon, A., & Velo, E. (2011). Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1668–1674. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.036>
- Frost, P., & Gilkinson, S. (2010). *18 MONTH PERFORMANCE SUMMARY FOR ANAEROBIC DIGESTION OF DAIRY COW SLURRY AT AFBI HILLSBOROUGH AFBI*.
- Galindo, J., Dolz, V., Royo-Pascual, L., Haller, R., & Melis, J. (2016). Modeling and experimental validation of a volumetric expander suitable for waste heat recovery from an automotive internal combustion engine using an organic Rankine cycle with ethanol. *Energies*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/en9040279>
- Galloni, E., Fontana, G., & Staccone, S. (2015). Design and experimental analysis of a mini ORC (organic Rankine cycle) power plant based on R245fa working fluid. *Energy*, 90, 768–775. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.104>
- Garfí, M., Ferrer-Martí, L., Perez, I., Flotats, X., & Ferrer, I. (2011). Codigestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude. *Ecological Engineering*, 37, 2066–2070. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.018>
- GASSERVEI. (n.d.). *R-1234ze*. www.gas-servei.com
- Giuffrida, A. (2018). A theoretical study on the performance of a scroll expander in an organic Rankine cycle with hydrofluoroolefins (HFOs) in place of R245fa. *Energy*, 161, 1172–1180. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.146>
- Honeywell International Inc. (2024). *Refrigerants India*. Genetron® 245fa. <https://www.honeywell-refrigerants.com/india/product/genetron-245fa/>

- Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2013). Biogas utilization: Experimental investigation on biogas flameless combustion in lab-scale furnace. *Energy Conversion and Management*, 74, 426–432. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.026>
- Huber, M. L., Lemmon, E. W., Bell, I. H., & McLinden, M. O. (2022). The NIST REFPROP Database for Highly Accurate Properties of Industrially Important Fluids. In *Industrial and Engineering Chemistry Research* (Vol. 61, Issue 42, pp. 15449–15472). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c01427>
- Indiamart. (2024a, June 27). *R123 prices*. R123 Prices. https://dir.indiamart.com/search.mp?ss=r123&prdsr=1&v=4&qry_typ=P¤t_mcatid=178822&q_r_nm=gd&res=RC2&com-cf=nl&ptrs=na&ktp=N0&mtp=S&lang=en&wc=1&Mspl=0&mcatid=&catid=
- Indiamart. (2024b, June 27). *R245FA prices*. https://dir.indiamart.com/search.mp?ss=r245fa&prdsr=1&v=4&qry_typ=P¤t_mcatid=36286&ptrs=na&lang=en&wc=1&mcatid=178822&catid=66&q_r_nm=gd&res=RC2&com-cf=nl&ktp=N0&mtp=G&Mspl=0
- Jaimés-Estévez, J., Vera Mercado, E., Jaramillo, J. G., Rodríguez, P., Martí-Herrero, J., Escalante, H., & Castro, L. (2022). From laboratory to farm-scale psychrophilic anaerobic co-digestion of cheese whey and cattle manure. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101168. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101168>
- Jaimés-Estévez, J., Zafra, G., Martí-Herrero, J., Pelaz, G., Morán, A., Puentes, A., Gomez, C., Castro, L. D. P., & Hernández, H. E. (2021). Psychrophilic full scale tubular digester

- operating over eight years: Complete performance evaluation and microbiological population. *Energies*, *14*(1). <https://doi.org/10.3390/en14010151>
- Ji, D., Haotong, C., Zihan, Y., Ding, L., Guohua, W., & Romagnoli, A. (2023). Comparison between thermoelectric generator and organic Rankine cycle for low to medium temperature heat source: A Techno-economic analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *102914*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102914>
- Jurgutis, L., Slepetiene, A., Volungevicius, J., & Amaleviciute-Volunge, K. (2020). Biogas production from chicken manure at different organic loading rates in a mesophilic full scale anaerobic digestion plant. *Biomass and Bioenergy*, *141*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105693>
- Kang, S. H. (2012). Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid. *Energy*, *41*(1), 514–524. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.035>
- Kapoor, R., Ghosh, P., Kumar, M., & Vijay, V. K. (2019). Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: a review. In *Environmental Science and Pollution Research*. Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04767-1>
- Kapoor, R., Ghosh, P., Tyagi, B., Vijay, V. K., Vijay, V., Thakur, I. S., Kamyab, H., Nguyen, D. D., & Kumar, A. (2020). Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, *273*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123052>

- Landelle, A., Tauveron, N., Haberschill, P., Revellin, R., & Colasson, S. (2017). Organic Rankine cycle design and performance comparison based on experimental database. *Applied Energy*, *204*, 1172–1187. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.012>
- Lansing, S., Botero, R. B., & Martin, J. F. (2008). Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. *Bioresource Technology*, *99*(13), 5881–5890. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.090>
- Lecompte, S., Huisseune, H., Van Den Broek, M., Vanslambrouck, B., & De Paepe, M. (2015a). Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 47, pp. 448–461). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.089>
- Lecompte, S., Huisseune, H., Van Den Broek, M., Vanslambrouck, B., & De Paepe, M. (2015b). Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 47, pp. 448–461). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.089>
- Li, L., Ge, Y. T., Luo, X., & Tassou, S. A. (2017). Experimental investigations into power generation with low grade waste heat and R245fa Organic Rankine Cycles (ORCs). *Applied Thermal Engineering*, *115*, 815–824. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.024>
- Li, M., Wang, J., He, W., Gao, L., Wang, B., Ma, S., & Dai, Y. (2013). Construction and preliminary test of a low-temperature regenerative Organic Rankine Cycle (ORC) using R123. *Renewable Energy*, *57*, 216–222. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.042>
- Lion, S., Michos, C. N., Vlaskos, I., Rouaud, C., & Taccani, R. (2017). A review of waste heat recovery and Organic Rankine Cycles (ORC) in on-off highway vehicle Heavy Duty Diesel

- Engine applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 691–708.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.082>
- Liu, L., Zhu, T., Gao, N., & Gan, Z. (2018). A Review of Modeling Approaches and Tools for the Off-design Simulation of Organic Rankine Cycle. In *Journal of Thermal Science* (Vol. 27, Issue 4, pp. 305–320). Science Press. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-1023-2>
- Luyben, W. L. (2023). Dual steam turbines in biogas power processes. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 190, 109412.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109412>
- Mahmoudi, A., Fazli, M., & Morad, M. R. (2018). A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle. In *Applied Thermal Engineering* (Vol. 143, pp. 660–675). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.136>
- Martí Herrero, J. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*.
- Martí-Herrero, J., Ceron, M., Garcia, R., Pracejus, L., Alvarez, R., & Cipriano, X. (2015). The influence of users' behavior on biogas production from low cost tubular digesters: A technical and socio-cultural field analysis. *Energy for Sustainable Development*, 27, 73–83.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.05.003>
- Masheiti, S., Agnew, B., & Walker, S. (2011). An Evaluation of R134a and R245fa as the Working Fluid in an Organic Rankine Cycle Energized from a Low Temperature Geothermal Energy Source. In *Journal of Energy and Power Engineering* (Vol. 5).
- Meteoprog.com. (2024, August 16). *El tiempo en Bucaramanga hoy*.
<https://www.meteoprog.com/es/weather/Bucaramanga/>
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2008). *Resolución número 909 del 05 de junio del 2008*.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631 del 17 de marzo del 2015*.
- Moradi, R., & Cioccolanti, L. (2024). Modelling approaches of micro and small-scale organic Rankine cycle systems: A critical review. In *Applied Thermal Engineering* (Vol. 236). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121505>
- Mudasar, R., Aziz, F., & Kim, M. H. (2017). Thermodynamic analysis of organic Rankine cycle used for flue gases from biogas combustion. *Energy Conversion and Management*, 153, 627–640. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.034>
- Muhammad, U., Imran, M., Lee, D. H., & Park, B. S. (2015). Design and experimental investigation of a 1 kW organic Rankine cycle system using R245fa as working fluid for low-grade waste heat recovery from steam. *Energy Conversion and Management*, 103, 1089–1100. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.045>
- Nelson, C. R. (2015). *APPLICATION OF REFRIGERANT WORKING FLUIDS FOR MOBILE ORGANIC RANKINE CYCLES*. 12–14.
- Nevzorova, T., & Kutcherov, V. (2019). Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review. In *Energy Strategy Reviews* (Vol. 26). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100414>
- Pang, K. C., Chen, S. C., Hung, T. C., Feng, Y. Q., Yang, S. C., Wong, K. W., & Lin, J. R. (2017). Experimental study on organic Rankine cycle utilizing R245fa, R123 and their mixtures to investigate the maximum power generation from low-grade heat. *Energy*, 133, 636–651. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.128>

- Pei, G., Li, J., Li, Y., Wang, D., & Ji, J. (2011). Construction and dynamic test of a small-scale organic rankine cycle. *Energy*, 36(5), 3215–3223. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.010>
- Peris, B., Navarro-Esbrí, J., & Molés, F. (2013). Bottoming organic Rankine cycle configurations to increase Internal Combustion Engines power output from cooling water waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.08.016>
- Pham, C. H., Vu, C. C., Sommer, S. G., & Bruun, S. (2014). Factors affecting process temperature and biogas production in small-scale rural biogas digesters in winter in northern vietnam. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 27(7), 1050–1056. <https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13534>
- Preißinger, M., Schwöbel, J. A. H., Klamt, A., & Brüggemann, D. (2017). Multi-criteria evaluation of several million working fluids for waste heat recovery by means of Organic Rankine Cycle in passenger cars and heavy-duty trucks. *Applied Energy*, 206, 887–899. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.212>
- Qiu, G., Liu, H., Riffat, S., & Riffat Expanders, S. (2011). Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 16, 31. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.06.008i>
- 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>

- Qyyum, M. A., Naquash, A., Ali, W., Haider, J., Noon, A. A., Rehan, M., Nizami, A. S., Yasin, M., & Lee, M. (2021). Process Systems Engineering Evaluation of Prospective Working Fluids for Organic Rankine Cycles Facilitated by Biogas Combustion Flue Gases. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.663261>
- Raab, F., Klein, H., & Opferkuch, F. (2021). STEAM RANKINE CYCLE INSTEAD OF ORGANIC RANKINE CYCLE FOR DISTRIBUTED WASTE HEAT RECOVERY-PROS AND CONS. In *6 th International Seminar on ORC Power Systems*.
- Shandong Qibo New Energy Co Ltd. (2024, June 27). *Ethanol prices*. Good Ethanol Price/Ethanol 96% CAS-64-17-5. <https://qibochemical.en.made-in-china.com/product/IdcGfhBOLVpv/China-Good-Ethanol-Price-Ethanol-96-CAS-64-17-5.html>
- Shao, L., Zhu, J., Meng, X., Wei, X., & Ma, X. (2017). Experimental study of an organic Rankine cycle system with radial inflow turbine and R123. *Applied Thermal Engineering*, 124, 940–947. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.042>
- Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z., & Yu, X. (2015). Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 51, pp. 521–532). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.029>
- Super Sonic Industries. (2024). *R1234ze Refrigerant Gas, Packaging Type: Cylinder, Packaging Size: 5kg*. <https://www.indiamart.com/proddetail/r1234ze-refrigerant-gas-27497938188.html>
- Surindra, M. D., Caesarendra, W., Prasetyo, T., Mahlia, T. M. I., & Taufik. (2019). Comparison of the utilization of 110 °C and 120 °C heat sources in a geothermal energy system using

- Organic Rankine Cycle (ORC) with R245fa, R123, and mixed-ratio fluids as working fluids. *Processes*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/pr7020113>
- Tavera-Ruiz, C., Martí-Herrero, J., Mendieta, O., Jaimes-Estévez, J., Gauthier-Maradei, P., Azimov, U., Escalante, H., & Castro, L. (2023). Current understanding and perspectives on anaerobic digestion in developing countries: Colombia case study. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 173). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113097>
- Tchanche, B. F., Lambrinos, G., Frangoudakis, A., & Papadakis, G. (2011). Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles - A review of various applications. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Issue 8, pp. 3963–3979). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.024>
- Tchanche, B. F., Loonis, P., Petrissans, M., & Ramenah, H. (2013). Organic Rankine Cycle Systems Principles, opportunities and challenge. *25th International Conference on Microelectronics (ICM)*, 1–4.
- Tchanche, B. F., Papadakis, G., Lambrinos, G., & Frangoudakis, A. (2009). Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 29, 2468–2476.
- Touaibi, R., Koten, H., & Boydak, O. (2020). Parametric study of an organic rankine cycle using different fluids. *Emerging Science Journal*, 4(2), 122–128. <https://doi.org/10.28991/esj-2020-01216>
- Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., & Borgnakke, C. (2000). *Fundamentos de termodinámica* (2nd ed.). Limusa.
- Verion ICSA. (2022). *Ecuaciones para Bombas y Motores*.

- Wang, E. H., Zhang, H. G., Fan, B. Y., Ouyang, M. G., Zhao, Y., & Mu, Q. H. (2011). Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery. *Energy*, 36(5), 3406–3418. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.041>
- Weather Spark. (2024a). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Bucaramanga*. <https://Es.Weatherspark.Com/y/24381/Clima-Promedio-En-Bucaramanga-Colombia-Durante-Todo-El-Año>. <https://es.weatherspark.com/y/24381/Clima-promedio-en-Bucaramanga-Colombia-durante-todo-el-a>
- Weather Spark. (2024b, August 16). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en el Aeropuerto Internacional de Palonegro*. www.openstreetmap.org/copyright
- Yağlı, H., Koç, Y., & Kalay, H. (2021). Optimisation and exergy analysis of an organic Rankine cycle (ORC) used as a bottoming cycle in a cogeneration system producing steam and power. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100985>
- Younus Bhuiyan Sabbir, A. S. M., Saha, C. K., Nandi, R., Zaman, M. F. U., Alam, M. M., & Sarker, S. (2021). Effects of seasonal temperature variation on slurry temperature and biogas composition of a commercial fixed-dome anaerobic digester used in bangladesh. *Sustainability (Switzerland)*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/su131911096>
- Zhang, X., Cao, M., Yang, X., Guo, H., & Wang, J. (2019). Economic analysis of Organic Rankine Cycle using R123 and R245fa as working fluids and a demonstration project report. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/app9020288>

Ziviani, D., Beyene, A., & Venturini, M. (2014). Advances and challenges in ORC systems modeling for low grade thermal energy recovery. *Applied Energy*, 121, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.074>

Apéndices

Apéndice A Diferencias en los enfoques del uso indirecto del biogás

Tabla 1A.

Diferencias en los enfoques del uso indirecto del biogás

MÉTODO	ENFOQUE	ELIMINACIÓN DE HUMEDAD	ELIMINACIÓN DE H ₂ S	INHIBICIÓN POR IMPUREZAS	COMPLEJIDAD DE CONDICIONES
Físico	Se centra en el aprovechamiento del biogás para motores mecánico-eléctricos	Es necesaria para preservar los equipos	No es totalmente necesaria	No ocurre inhibición física	Condiciones moderadas y fáciles de manipular
Químico	Se centra en la conversión del gas en nuevos productos por rutas químicas	Es necesaria para evitar reacciones indeseadas	Es necesaria para evitar envenenar catalizadores	Hay inhibición de reacción y catalizadores	Condiciones extremas de presión y temperatura
Biológico	Se centra en la conversión del gas en nuevos productos por rutas biológicas	Es necesaria para acondicionar el biogás	Es necesaria para evitar intoxicación de las cepas	Hay inhibición y muerte de las cepas	Condiciones exigentes para mantener a las cepas

Nomenclatura:  Ventaja  Neutral  Desventaja

Nota. Adaptado de (Kapoor et al., 2020)

Apéndice B . Diferencias en los enfoques del uso indirecto del biogás

Tabla 1B.

Diferencias en los enfoques del uso indirecto del biogás

APLICACIÓN	EFICIENCIA	COSTOS	MANTENIMIENTO	HUMEDAD	H ₂ S	OTRAS IMPUREZAS
Caldera	Alta (75 – 85%)	Bajos	Sencillo y mínimo	Eliminar para evitar corrosión	Alta tolerancia (1000 ppm)	No requiere eliminación de impurezas
Motores de Combustión Interna	Media (30 – 40%)	Altos	Costoso, complejo y frecuente	Eliminar para evitar formación de ácidos	Media tolerancia (500 ppm)	Eliminar siloxanos debido a abrasión
Motores de Encendido por Chispa	Media-baja (28 – 43%)	Altos	Complejo y extenso	Requiere eliminación	Requiere eliminación (<100 ppm)	Requiere eliminación de siloxanos
Turbina	No se han usado por no alcanzar la capacidad mínima con una planta común de biogás.					
Microturbina	Baja (15 – 30%)	Altos	Costosos y específicos	Eliminar para evitar comprimir líquido	Baja tolerancia (<200 ppm)	Eliminar siloxanos debido a corrosión
Motores Stirling	Media-baja (28 – 43%)	Altos	Sencillo y mínimo (Experiencia limitada)	Alta tolerancia	Alta tolerancia (1000 ppm)	No requiere eliminación de impurezas
Celdas de Combustible	Media (30 – 70%)	Altos	Complejo y específico	Eliminar debido a alta sensibilidad	Requiere eliminación (<20 ppm)	Eliminar debido a alta sensibilidad

Nota. Adaptado de (Sun et al., 2015)

Apéndice C Características del Ciclo de Rankine y el Ciclo Orgánico de Rankine**Tabla 1C.***Comparativa de las características del Ciclo de Rankine y el Ciclo Orgánico de Rankine*

Tecnología	CPUP (\$/kW)	RP	Eficiencia	Ventajas	Desventajas
Ciclo de Rankine	1,112- 6,136	>1 MWe	30 %	<ol style="list-style-type: none"> 1. Amplio uso en producción de energía a gran escala. 2. Mayor eficiencia, fluido de trabajo de bajo costo, 3. Fluido de trabajo ambientalmente amigable, no inflamable y no tóxico. 4. Bajo consumo de bomba. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Requiere de sobrecalentamiento para su expansión ($T > 450^{\circ}\text{C}$). 2. Riesgo de corrosión por formación de gotas en la condensación. 3. Maneja presiones relativamente elevadas 30 – 40 bar. 4. Se utilizan turbinas con varias etapas de expansión.
Ciclo Orgánico de Rankine	1,250- 2,800	<300 kW a >10 MW	10-25 %	<ol style="list-style-type: none"> 1. Puede ser utilizado para fuentes de baja, media y alta temperatura lo que permite tener múltiples fuentes. 2. No requiere sobrecalentamiento 3. Más compacto 4. No requiere temperaturas ni presiones tan altas (<30 bar) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La aplicación del fluido depende del caso de aplicación, asimismo algunos fluidos son inflamables, tóxicos o su acceso es restringido.

Basado en: (Ji et al., 2023; Quoilin et al., 2013; Tchanche et al., 2013)

Apéndice D Características de los diferentes grupos de fluidos para el COR**Tabla 1D.***Características de los diferentes grupos de fluidos para el COR*

Grupo	Características	Ejemplo
Hidrocarburos	-Propiedades termodinámicas deseables -Problemas por la inflamabilidad	Butano, isobutano, tolueno, benceno, etc.
Perfluorocarbonos	-Inertes y estables. -Propiedades termodinámicas indeseables.	R-14, R116, R218, R3-1-10, etc.
Siloxanos	-Baja toxicidad y nivel inflamable. -Buen conductor térmico.	MM, MDM, MD2, MMD3M, D4, D5, D6
Clorofluorocarbonos (CFCs)	-Inerte, no explosivo, no inflamable y no tóxico. -Agota la capa de ozono y tiene potencial de efecto invernadero.	R11, R12, R13, R113, R114 y R115
Hidroclofluorocarbonos (HCFCs)	-Inerte, no explosivo, no inflamable y no tóxico (este último con excepciones). -Agota la capa de ozono y sustituyeron a los CFCs por tener un menor potencial de efecto invernadero.	R21, R22, R123 y R124.
Hidrofluorocarbonos (HFCs)	-Inertes, no explosivos, no inflamables y no tóxicos. -No agotan la capa de ozono. - Tienen un alto potencial de efecto invernadero.	R134a, R152a, R245fa, etc.
Éteres y éteres fluorados	-Inflamable y tóxico. -Propiedades termodinámicas indeseables.	No fluorados: Dimetiléter, dietiléter, etc. Fluorados: RE134, RE245, RE245mc, etc.
Alcoholes	-Inflamable. -Propiedades termodinámicas indeseadas (fluido húmedo). -Se obtienen buenas eficiencias.	Metanol y etanol.
Inorgánicos	-Disponibilidad mayor y económicos. -Con algunos problemas operacionales. -Menor impacto ambiental	Amoniaco, agua, dióxido de carbono, etc.

Nota. Adaptado de (Bao & Zhao, 2013; Kolsch & Radulovic, 2015; Quetglas Blancher, 2018)

Apéndice E Referencias de la producción y contenido de biogás en biodigestores**Tabla 1E.***Datos registrados para producción y contenido de biogás en biodigestores*

Autor	Sustrato	Contenido de metano	Volumen del biodigestor (m³)	Ubicación
Martí-Herrero et al. (2015)	Cerdo	43,9	6,47	Bolivia
	Cerdo	43,5	12,9	Bolivia
	Vaca	49,6	3,65	Bolivia
	Vaca	46,5	6,5	Bolivia
Jaimes-Estévez et al. (2021)	Cerdo	63,1	103,1	Colombia
Ferrer et al. (2011)	Vaca	49	7,5	Perú
	Vaca	62,7	7,5	Perú
	Vaca	67	6	Perú
	Vaca	63	2,4	Perú
Jaimes-Estévez et al. (2022)	Vaca	50,55	5,2	Colombia
Garfí et al. (2011)	Vaca	54,4	7,5	Perú
Younus Bhuiyan Sabbir et al. (2021)	Pollo	56,8	350	Bangladesh
	Pollo	62,5	350	Bangladesh
Jurgutis et al. (2020)	Pollo	61,5	-	Lituania
Pham et al. (2014)	Cerdo	68,4	40	Vietnam
Lansing et al. (2008)	Cerdo	67,9	40	Costa Rica
	Cerdo	63,9	25	Costa Rica
	Cerdo	61,4	25	Costa Rica
	Cerdo	68,8	70	Costa Rica
Ahlberg-Eliasson et al. (2017)	Cerdo	55	550	Suecia
	Vaca	56	570	Suecia
	Vaca	59	261	Suecia
	Vaca	55	600	Suecia
	Vaca	59	1.206	Suecia
	Vaca	56	165	Suecia
	Vaca	58	300	Suecia
	Vaca	54	300	Suecia
	Vaca	57	655	Suecia
	Cerdo	62	260	Suecia
Cerdo	65	1.200	Suecia	

Apéndice F Proceso de condensación para el objetivo 1

Figura 1F.

Procedimiento para la estimación de la densidad del agua a 160°C y 350 kPa

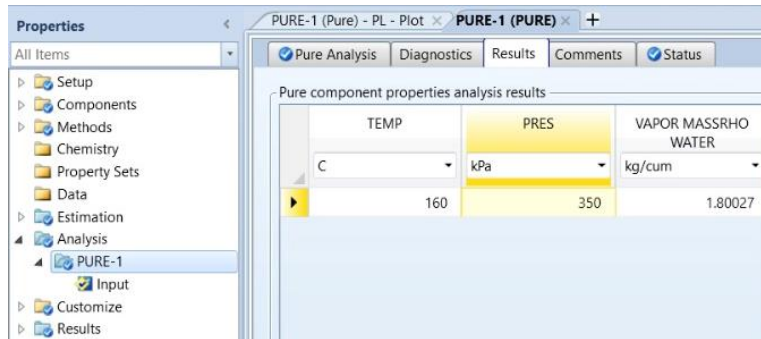


Figura 2F.

Procedimiento para la estimación de la densidad del R123 a 160°C y 350 kPa

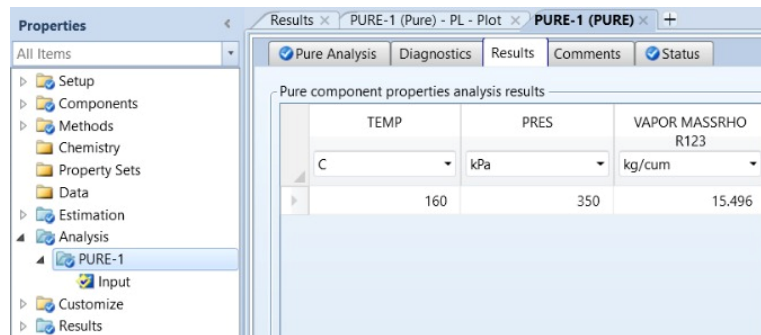


Figura 3F.

Procedimiento para la estimación de la densidad del R123 a 160°C y 350 kPa

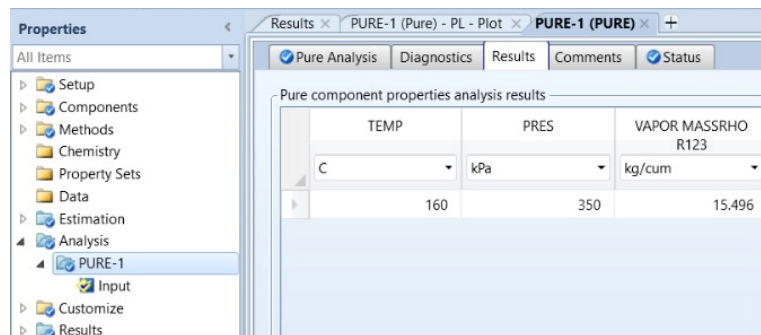
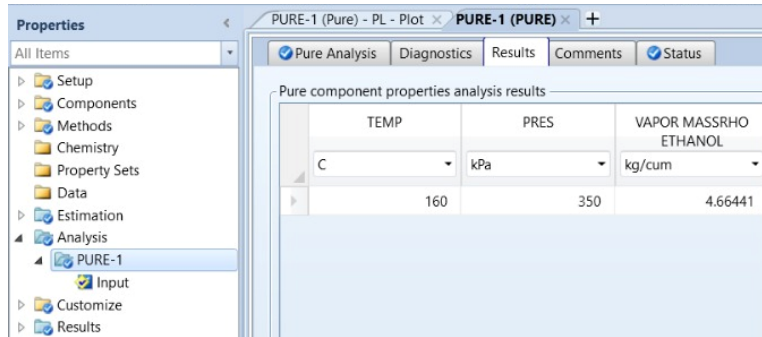


Figura 4F.

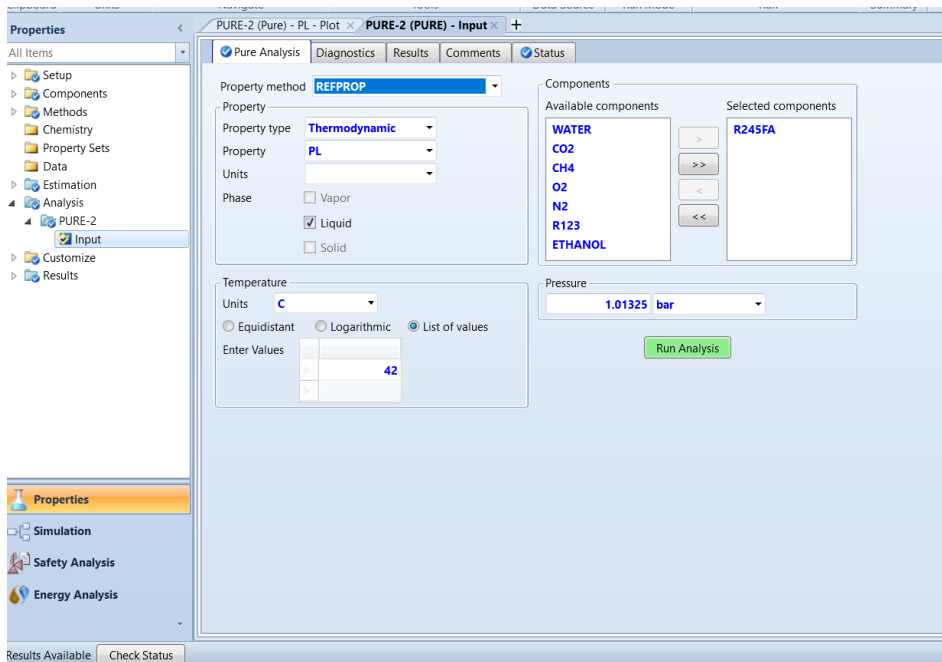
Procedimiento para la estimación de la densidad del etanol a 160°C y 350 kPa



Con la ayuda de Aspen Plus, se pudo determinar la presión de saturación a la salida del condensador a la temperatura de 44°C para su posterior subenfriamiento a 34° C. Se observa que la presión de saturación tanto para el agua (8.2095 kPa) como para el etanol (19.8083 kPa) es inferior a la presión atmosférica (89.925 kPa). Por ende, se propone utilizar para el etanol la presión atmosférica y en el caso del agua se propone una presión de expansión de 251 kPa para asegurar su sobrecalentamiento en el proceso expansivo y que el programa de Aspen plus no arroje errores relacionados con la formación de líquido dentro del expansor. Después del proceso expansivo, se presenta la condensación a 34°C, asumiendo que no existen caídas de presión dentro del intercambiador. Finalmente, el fluido condensado es bombeado al intercambiador de calor, donde entra en contacto con los gases de combustión.

Figura 5F.

Procedimiento para la estimación de la presión de saturación



Nota. El proceso de estimación de la presión de saturación se calcula siguiendo la ruta: Propiedades > análisis> Sustancia pura > Seleccionando el paquete termodinámico > la variable de interés PL (presión de vapor para líquido) > Seleccionando el componente y la sustancia de interés.

Tabla 1F.

Presión de entrada y de expansión para el objetivo 1

Fluido de trabajo	Presión de entrada (kPa)	Presión de expansión (kPa)
Agua		251
Etanol	350	89.925
R123		175.969
R245fa		285.223

Nota: Esta tabla corresponde al objetivo 1 el cual se realizó la lectura de la presión de saturación a 44°C con un subenfriamiento posterior de 34°C.

Tabla 2F.

Presión de entrada y de expansión para el objetivo 1

Fluido de trabajo	Presión de entrada (kPa)	Presión de expansión (kPa)
Agua	1200	618.2
Etanol		157.3
R123		170.4
R245fa		226.6

Nota: Esta tabla corresponde al objetivo 2 el cual se realizó la lectura de la presión de saturación a la temperatura ideal + 10K para cada una de las sustancias y también se consideraron estas presiones para la optimización de los refrigerantes en el ciclo planteado para el expansor ES E15H022A-SH. Tavera-Ruiz et al. (2023).

El proceso de combustión puede alcanzar una combustión estable con un exceso de aire en el rango de 1.15 a 1.3, lo que permite mantener la producción de monóxido de carbono por debajo de 3 partículas por millón (ppm) (Jiao et al., 2023). Asimismo, la literatura indica que un exceso de aire del 21% maximiza la formación de dióxido de carbono en comparación con el monóxido donde finalmente ocurre la reacción de combustión (Hosseini & Wahid, 2013).

En términos de la eficiencia del evaporador utilizando biogás se reporta que usualmente se encuentra en el rango del 75 a 90% de eficiencia (Frost & Gilkinson, 2010), donde para el efecto de este trabajo se consideró un promedio de 83%, valor con el cual se multiplica la corriente 9. Finalmente, la figuración presentada de los equipos utilizados se encuentra en la tabla 2F.

Tabla 2F.*Configuración y equipos para cada etapa*

Etapa	Equipo	Configuración
Intercambiador de calor	MHeatX	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se utiliza para representar la transferencia de calor entre múltiples corrientes calientes y frías. ✓ Asegura un balance energético general sin considerar la geometría del intercambiador.
Expansión	Compr	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se configuró como compresor politrópico y se introdujo la eficiencia y la presión de salida.
Bombeo	Pump	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se configuró la bomba con una eficiencia isentrópica de 75% y la presión de entrada al expansor
Reactor	RStoic	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Modela un reactor estequiométrico con reacción especificada
Multiplicador	MMult	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Multiplica el caudal total por el factor proporcionado, en este caso correspondiente a la eficiencia térmica de un boiler de biogás

Tomado de: (Aspen Plus V.14, n.d.)

Apéndice G Límites de aplicación de los compuestos empleados

Tabla 1G.

Configuración y equipos para cada etapa

Componente	Límites de aplicación
CH ₄	90.6941-625K, 1000 Mpa
CO ₂	216.592-2000 K, 800 MPa

H ₂ O	273.16-2000 K, 1000 MPa
O ₂	54.361-2000 K, 82 MPa
N ₂	63.151-2000K, 2200 MPa
R123	166-600 K, 40 MPa
R245fa	171.05-440 K, 200 MPa
Etanol	250-650 K, 280 MPa

Tomado de: (Aspen Plus V.14, n.d.)

Apéndice H Proceso politrópico

El proceso politrópico descrito demuestra una relación funcional especial entre P y V durante un proceso. En este caso la eficiencia politrópica es usada en la ecuación para la expansión politrópica definida en este trabajo.

$$\frac{n-1}{n} = \left(\frac{k-1}{k} \right) / \eta_p$$

$$\Delta h = \frac{P_{in} V_{in}}{\eta_p \left(\frac{n-1}{n}\right)} \left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

η_c =Coeficiente politrópico

k =Relación de capacidad calorífica C_p/C_v

η_p =Eficiencia politrópica

Δh =Cambio de entalpía por mol

PAG=Presión

V =Volumen molar

De manera similar, para un proceso politrópico, la caída desarrollada se convierte en:

$$HEAD_p = f \frac{p_1 V_1}{\left(\frac{n-1}{n}\right)} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]$$

Donde el exponente de volumen politrópico promedio n se define como:

$$n = \frac{\ln(p_2/p_1)}{\ln(V_1/V_2)} \quad f = \frac{h_s - h_1}{p_2 V_s - p_1 V_1} \frac{n_s - 1}{n_s} \quad n_s = \frac{\ln(p_2/p_1)}{\ln(V_1/V_s)}$$

Apéndice I Complemento de resultados objetivo 1 de ciclos con AGUA

Tabla II.

Resultados para los ciclos del agua con condición de entrada al expansor a 350kpa y 160°C

Flujo másico del fluido de trabajo (kg/h)	3,13
Trabajo del expansor (W)	26,00
Trabajo de la bomba (W)	0,12
Calor suministrado (W)	2.292
Calor cedido (W)	2.266
Eficiencia (η) (%)	1,13

Figura 1I.

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del agua con condición de entrada al expansor a 350kpa y 160°C

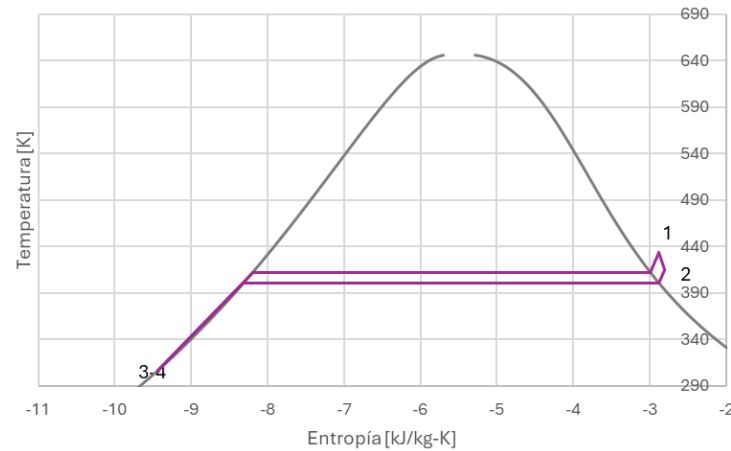


Tabla 2I.

Variables termodinámicas del ciclo del agua con condición de entrada al expansor a 350kpa y 160°C

Etapa	Temperatura (K)		Presión (kPa)		Entalpía (kJ/kg)		Entropía (kJ/kg)	
Evaporación y sobrecalentamiento	T4	307,2	P4	350	h4	-15828,10	s4	-8,94
	T1	433,2	P1	350	h1	-13192,00	s1	-2,38
Expansión	T1	433,2	P1	350	h1	-13192,00	s1	-2,38
	T2	415,3	P2	251	h2	-13222,40	s2	-2,30
Condensación	T2	415,3	P2	251	h2	-13222,40	s2	-2,30
	T3	307,2	P3	251	h3	-15828,20	s3	-8,94
Compresión	T3	307,2	P3	251	h3	-15828,20	s3	-8,94
	T4	307,2	P4	350	h4	-15828,10	s4	-8,94

Tabla 3I.

Contenido de metano y rendimiento para el agua con condición de entrada al expansor a 350kpa y 160°C

Contenido de metano (%)	45,0	55,0	65,0
Rendimiento de biogás (R_{biogás}) (W/m³)	2746,0	3368,5	3989,8
Flujo biogas (m³/h)	0,8	0,7	0,6
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	31,2	38,2	45,3

Nota. v: Flujo volumétrico de biogás (m³/h), R_{biogás}: Rendimiento del biogás Wh de energía neta transformada/m³ de biogás), R:

Rendimiento del ciclo (Wh /m³ de biogás)

Figura 2I.

Ciclo del agua con 45% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

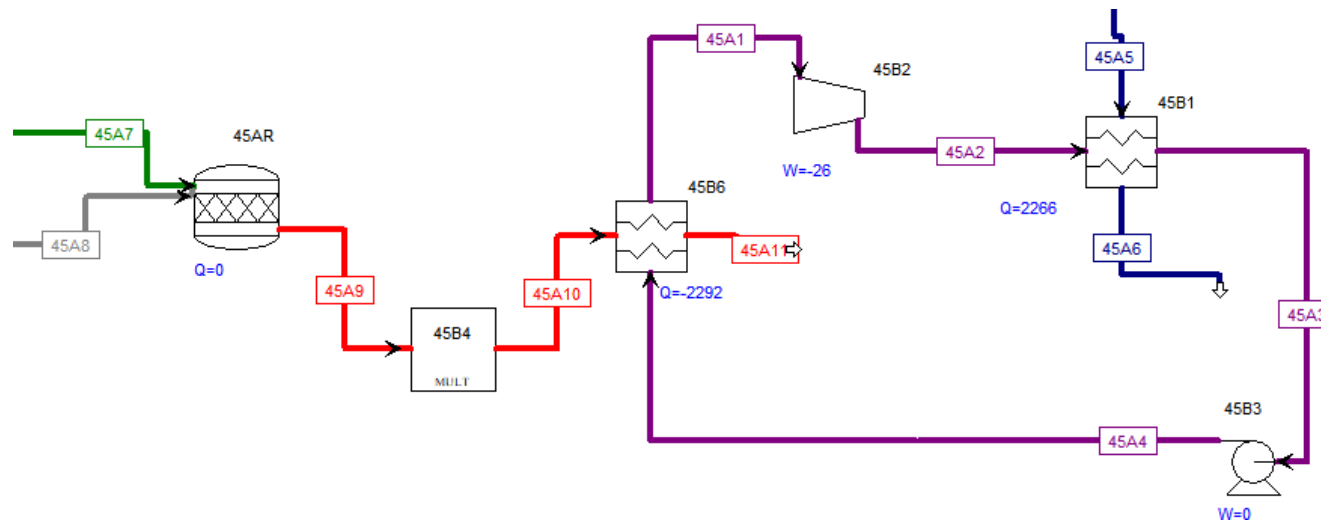


Tabla 4I.

Resultados del agua con 45% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	45A1	45A2	45A3	45A4	45A5	45A6	45A7	45A8	45A9	45A10	45A11
T (K)	433,15	415,323	307,15	307,16	297,15	302,196	297,15	297,15	1849,09	1849,09	473,224
P (kPa)	350	251	251	350	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-13192	-13222,4	-15828,2	-15828,1	-15870,2	-15849,1	-7956,32	-1,21971	-1373,66	-1373,66	-3165,02
s (kJ/kg K)	-2,38	-2,30	-8,94	-8,94	-9,07	-9,00	-0,90	0,18	2,33	2,33	0,60
m (kmol/s)	4,83E-05	4,83E-05	4,83E-05	4,83E-05	5,96E-03	5,96E-03	8,46E-06	4,42E-05	5,27E-05	4,37E-05	4,37E-05
M (kg/s)	8,69E-04	8,69E-04	8,69E-04	8,69E-04	1,07E-01	1,07E-01	2,66E-04	1,28E-03	1,54E-03	1,28E-03	1,28E-03
V (m³/s)	4,83E-04	6,48E-04	8,74E-07	8,74E-07	1,08E-04	1,08E-04	2,32E-04	1,21E-03	9,01E-03	7,48E-03	1,91E-03

Figura 3I.

Ciclo del agua con 55% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

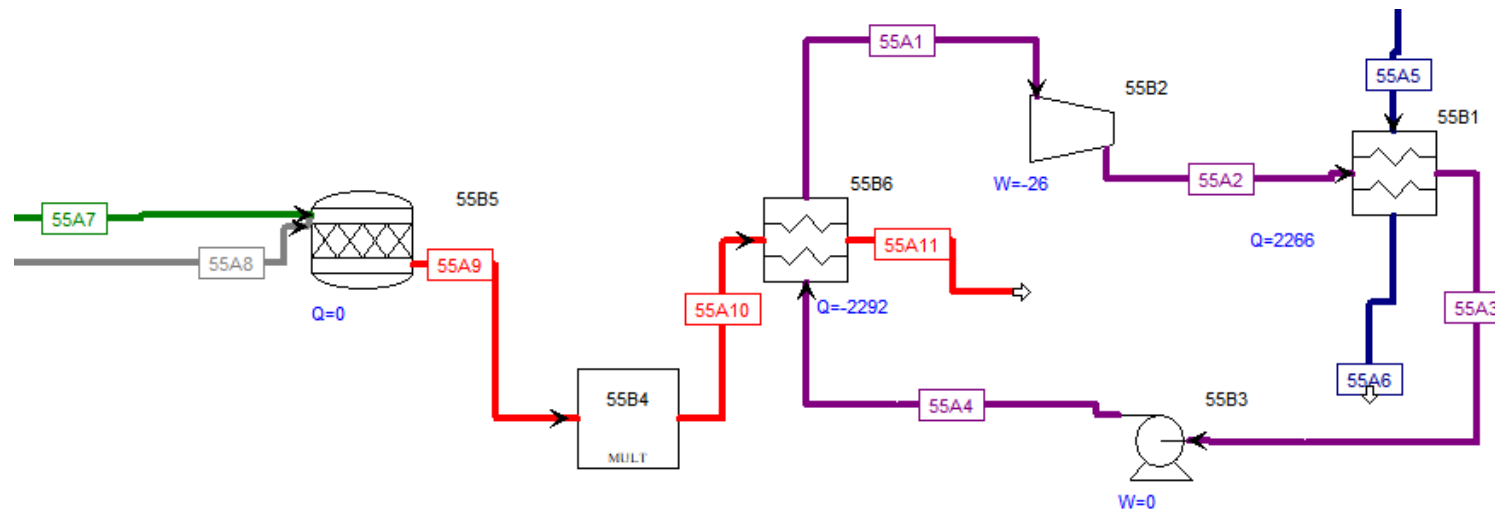


Tabla 5I.

Resultados del agua con 55% de Metano en el biogás como la fuente de alta

Corriente	55A1	55A2	55A3	55A4	55A5	55A6	55A7	55A8	55A9	55A10	55A11
T (K)	433,15	415,323	307,15	307,16	297,15	302,196	297,15	297,15	1908,01	1908,01	473,144
P (kPa)	350	251	251	350	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-13192	-13222,4	-15828,2	-15828,1	-15870,2	-15849,1	-7619,24	-1,21971	-1024,91	-1024,91	-2904,27
s (kJ/kg K)	-2,38	-2,30	-8,94	-8,94	-9,07	-9,00	-1,27	0,18	2,36	2,36	0,59
m (kmol/s)	4,83E-05	4,83E-05	4,83E-05	4,83E-05	5,96E-03	5,96E-03	6,90E-06	4,41E-05	5,10E-05	4,23E-05	4,23E-05
M (kg/s)	8,69E-04	8,69E-04	8,69E-04	8,69E-04	1,07E-01	1,07E-01	1,97E-04	1,27E-03	1,47E-03	1,22E-03	1,22E-03
V (m ³ /s)	4,83E-04	6,48E-04	8,74E-07	8,74E-07	1,08E-04	1,08E-04	1,89E-04	1,21E-03	9,00E-03	7,47E-03	1,85E-03

Figura 4I.

Ciclo del agua con 65% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

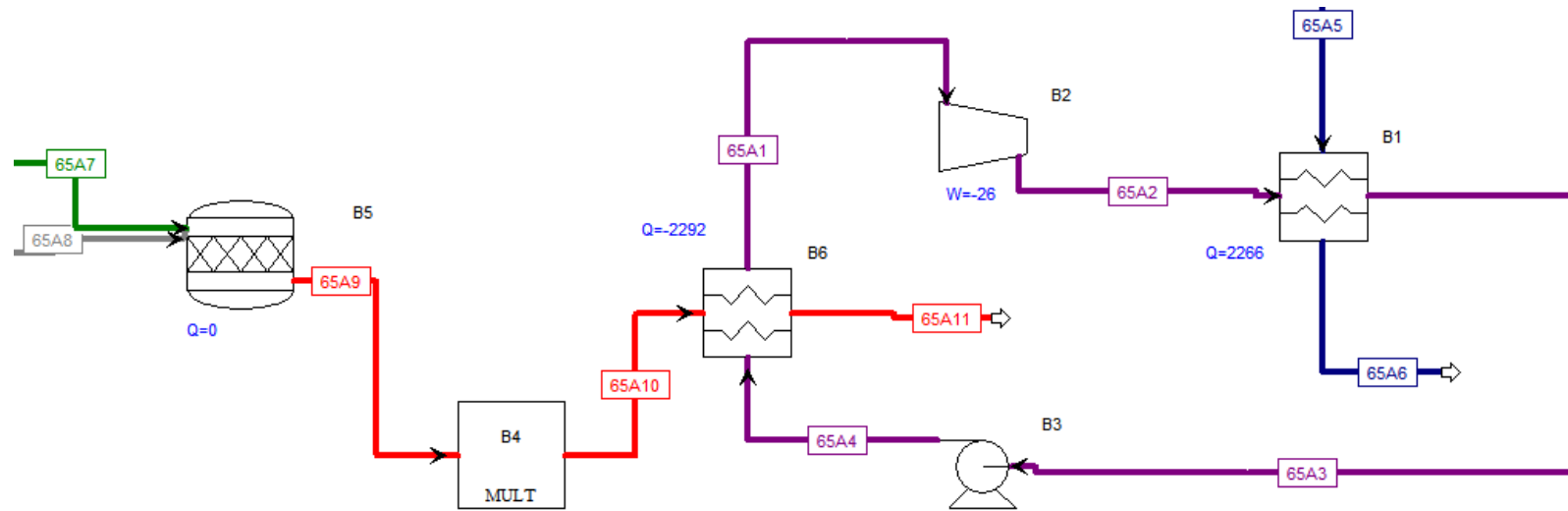


Tabla 6I.

Resultados del agua con 65% de Metano en el biogás como la fuente de alta

Corriente	65A1	65A2	65A3	65A4	65A5	65A6	65A7	65A8	65A9	65A10	65A11
T (K)	433,15	415,323	307,15	307,16	297,15	302,196	297,15	297,15	1952,12	1952,12	473,541
P (kPa)	350	251	251	350	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-13192	-13222,4	-15828,2	-15828,1	-15870,2	-15849,1	-7209,18	-1,21971	-764,733	-764,733	-2709,95
s (kJ/kg K)	-2,38	-2,30	-8,94	-8,94	-9,07	-9,00	-1,75	0,18	2,39	2,39	0,58
m (kmol/s)	4,83E-05	4,83E-05	4,83E-05	4,83E-05	5,96E-03	5,96E-03	5,82E-06	4,40E-05	4,98E-05	4,13E-05	4,13E-05
M (kg/s)	8,69E-04	8,69E-04	8,69E-04	8,69E-04	1,07E-01	1,07E-01	1,50E-04	1,27E-03	1,42E-03	1,18E-03	1,18E-03
V (m ³ /s)	4,83E-04	6,48E-04	8,74E-07	8,74E-07	1,08E-04	1,08E-04	1,60E-04	1,21E-03	8,99E-03	7,46E-03	1,81E-03

Apéndice J Complemento de resultados objetivo 1 de ciclos con ETANOL

Tabla 1J.

Resultados para los ciclos del ETANOL con condición de entrada al expansor a 350kpa y 160°C

Flujo másico del fluido de trabajo (kg/h)	8,1
Trabajo del expansor (W)	114,0
Trabajo de la bomba (W)	1,0
Calor suministrado (W)	2495,0
Calor cedido (W)	2382,0
Eficiencia (η) (%)	4,5

Figura 1J.

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del ETANOL con condición de entrada al expansor a 350kpa y 160°C

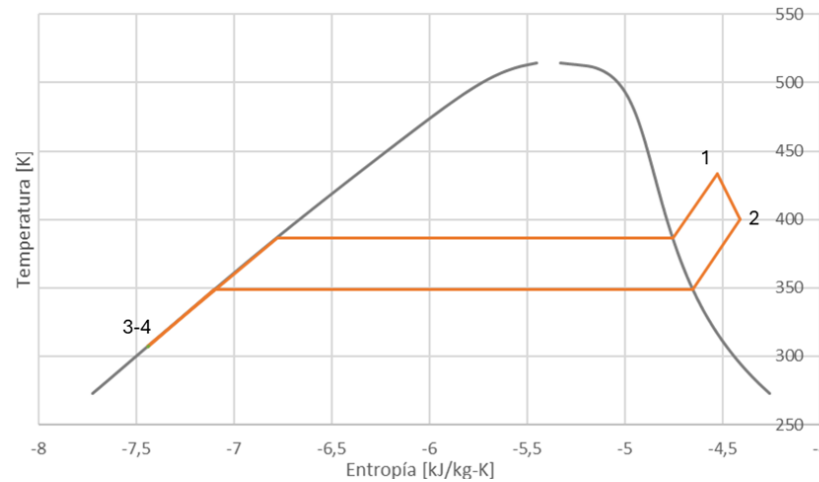


Tabla 2J.

Variables termodinámicas del ciclo del ETANOL con condición de entrada al expansor a 350kpa y 160°C

Etapa	Temperatura (K)		Presión (kPa)		Entalpía (kJ/kg)		Entropía (kJ/kg)	
Evaporación y sobrecalentamiento	T4	307,2	P4	350	h4	-5999,35	s4	-7,44
	T1	433,2	P1	350	h1	-4893,36	s1	-4,53
Expansión	T1	433,2	P1	350	h1	-4893,36	s1	-4,53
	T2	399,8	P2	89,9	h2	-4943,77	s2	-4,41
Condensación	T2	399,8	P2	89,9	h2	-4943,77	s2	-4,41
	T3	307,2	P3	89,9	h3	-5999,80	s3	-7,44
Compresión	T3	307,2	P3	89,9	h3	-5999,80	s3	-7,44
	T4	307,2	P4	350	h4	-5999,35	s4	-7,44

Tabla 3J.

Contenido de metano y rendimiento para el ETANOL con condición de entrada al expansor a 350kpa y 160°C

Contenido de metano (%)	45,0	55,0	65,0
Rendimiento de biogás (W/m³)	2746,2	3367,8	3992,0
Flujo biogás (m³/h)	0,9	0,7	0,6
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	125,5	153,9	182,4

Figura 2J.

Ciclo del ETANOL con 45% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

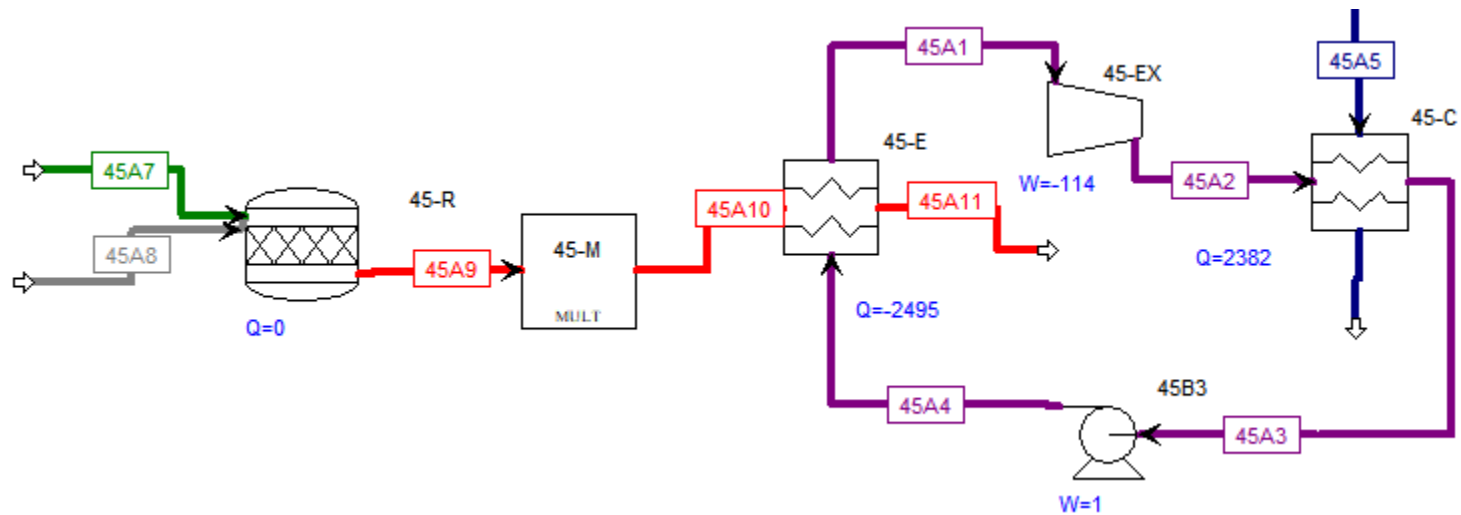


Tabla 4J.

Resultados del ETANOL con 45% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	45A1	45A2	45A3	45A4	45A5	45A6	45A7	45A8	45A9	45A10	45A11
T (K)	433,15	399,827	307,15	307,24	297,15	301,704	297,15	297,15	1848,62	1848,62	473,287
P (kPa)	350	89,925	89,925	350	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4893,36	-4943,77	-5999,8	-5999,35	-15870,2	-15851,2	-7956,32	-1,21971	-1373,14	-1373,14	-3163,69
s (kJ/kg K)	-4,53	-4,41	-7,44	-7,44	-9,07	-9,01	-0,90	0,18	2,33	2,33	0,60
m (kmol/s)	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	6,94E-03	6,94E-03	9,21E-06	4,81E-05	5,74E-05	4,76E-05	4,76E-05
M (kg/s)	2,26E-03	2,26E-03	2,26E-03	2,26E-03	1,25E-01	1,25E-01	2,89E-04	1,39E-03	1,68E-03	1,39E-03	1,39E-03
V (m ³ /s)	4,84E-04	1,78E-03	2,90E-06	2,90E-06	1,25E-04	1,26E-04	2,52E-04	1,32E-03	9,81E-03	8,14E-03	2,08E-03

Figura 3J.

Esquema del ciclo del ETANOL con 55% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

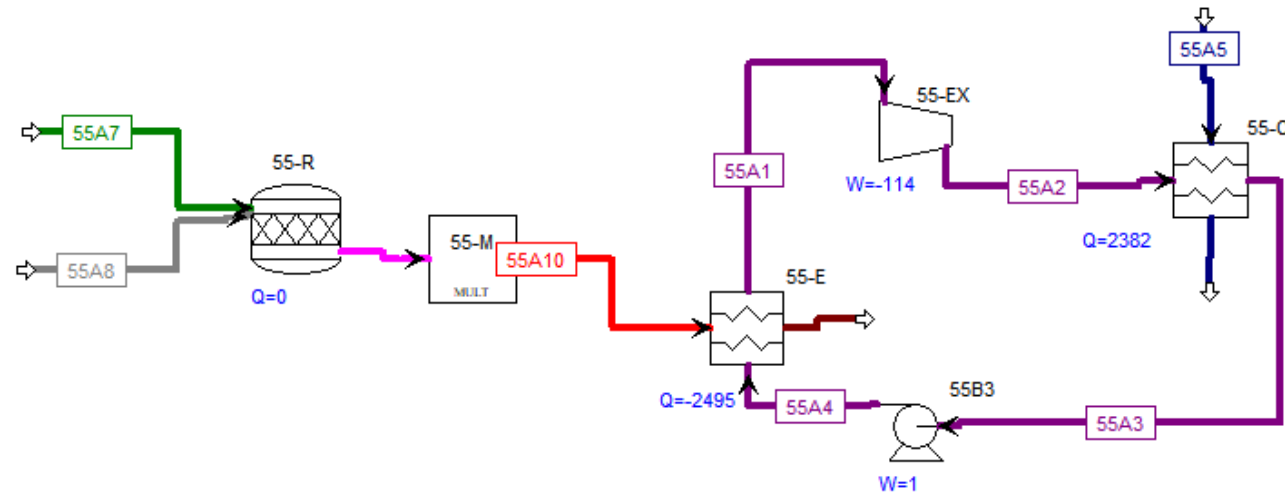


Tabla 5J.

Resultados del ETANOL con 55% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	55A1	55A2	55A3	55A4	55A5	55A6	55A7	55A8	55A9	55A10	55A11
T (K)	433,15	399,827	307,15	307,24	297,15	301,704	297,15	297,15	1907,26	1907,26	473,619
P (kPa)	350	89,925	89,925	350	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4893,36	-4943,77	-5999,8	-5999,35	-15870,2	-15851,2	-7619,24	-1,21971	-1024,31	-1024,31	-2901,94
s (kJ/kg K)	-4,53	-4,41	-7,44	-7,44	-9,07	-9,01	-1,27	0,18	2,36	2,36	0,59
m (kmol/s)	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	6,94E-03	6,94E-03	7,51E-06	4,80E-05	5,55E-05	4,61E-05	4,61E-05
M (kg/s)	2,26E-03	2,26E-03	2,26E-03	2,26E-03	1,25E-01	1,25E-01	2,15E-04	1,39E-03	1,60E-03	1,33E-03	1,33E-03
V (m ³ /s)	4,84E-04	1,78E-03	2,90E-06	2,90E-06	1,25E-04	1,26E-04	2,06E-04	1,32E-03	9,80E-03	8,13E-03	2,02E-03

Figura 4J.

Esquema del ciclo del ETANOL con 65% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

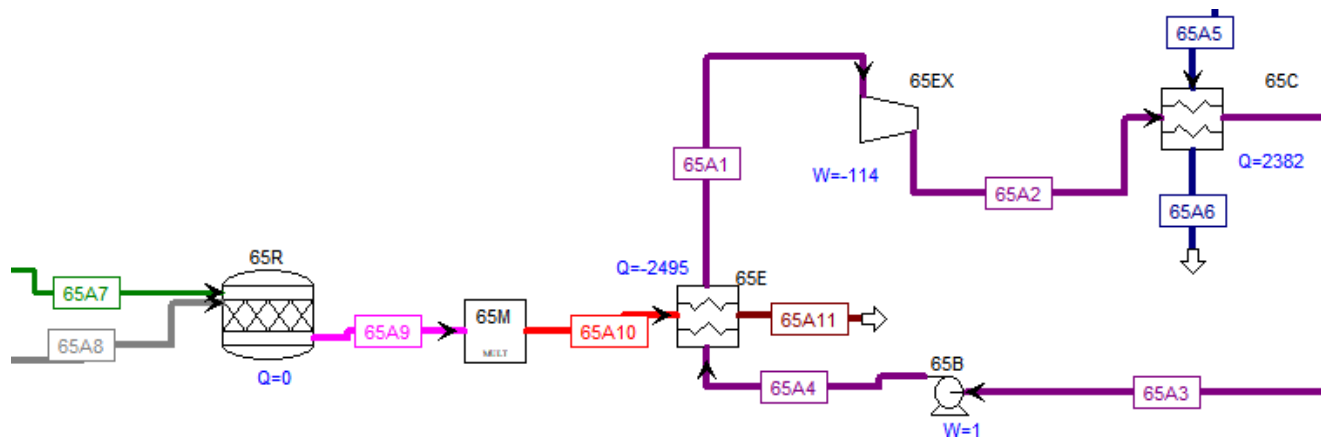


Tabla 6J.

Resultados del ETANOL con 65% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	65A1	65A2	65A3	65A4	65A5	65A6	65A7	65A8	65A9	65A10	65A11
T (K)	433,15	399,827	307,15	307,24	297,15	301,704	297,15	297,15	1953,67	1953,67	473,023
P (kPa)	350	89,925	89,925	350	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4893,36	-4943,77	-5999,8	-5999,35	-15870,2	-15851,2	-7209,18	-1,21971	-765,628	-765,628	-2713,92
s (kJ/kg K)	-4,53	-4,41	-7,44	-7,44	-9,07	-9,01	-1,75	0,18	2,39	2,39	0,58
m (kmol/s)	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	6,94E-03	6,94E-03	6,33E-06	4,78E-05	5,41E-05	4,49E-05	4,49E-05
M (kg/s)	2,26E-03	2,26E-03	2,26E-03	2,26E-03	1,25E-01	1,25E-01	1,64E-04	1,38E-03	1,54E-03	1,28E-03	1,28E-03
V (m ³ /s)	4,84E-04	1,78E-03	2,90E-06	2,90E-06	1,25E-04	1,26E-04	1,74E-04	1,31E-03	9,78E-03	8,12E-03	1,97E-03

Apéndice K Complemento de resultados objetivo 1 de ciclos con R123**Tabla 1K.**

Resultados para los ciclos del R123 con condición de entrada al expansor a 350kPa y 160°C

Flujo másico del fluido de trabajo (kg/h)	26,96
Trabajo del expansor (W)	46
Trabajo de la bomba (W)	1
Calor suministrado (W)	1959
Calor cedido (W)	1914
Eficiencia (%)	2,30

Figura 1K.

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del R123 con condición de entrada al expansor a 350kPa y 160°C

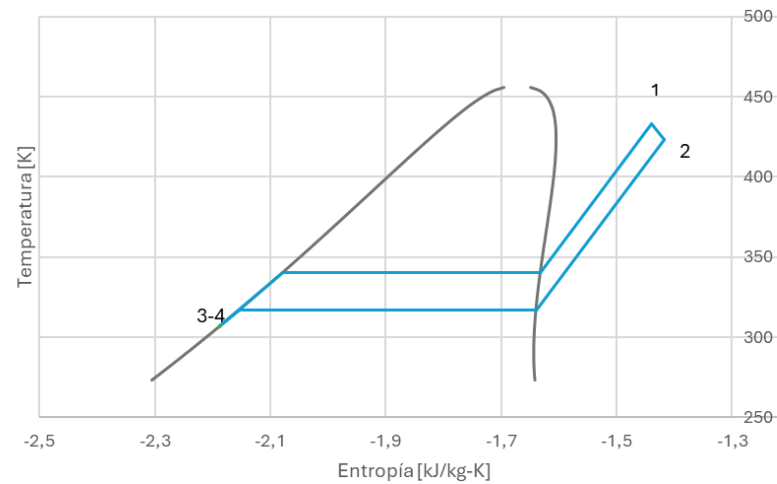


Tabla 2K.

Variables termodinámicas del ciclo del R123 con condición de entrada al expansor a 350kPa y 160°C

Etapa	Temperatura (K)	Presión (kPa)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg)
Evaporación y sobrecalentamiento	T4 307,3	P4 350	h4 -5028,63	s4 -2,19
	T1 433,2	P1 350	h1 -4767,03	s1 -1,44
Expansión	T1 433,2	P1 350	h1 -4767,03	s1 -1,44
	T2 423,5	P2 176,0	h2 -4773,24	s2 -1,42
Condensación	T2 423,5	P2 176	h2 -4773,24	s2 -1,42
	T3 307,2	P3 176	h3 -5028,79	s3 -2,19
Compresión	T3 307,2	P3 176	h3 -5028,79	s3 -2,19
	T4 307,3	P4 350	h4 -5028,63	s4 -2,19

Tabla 3K.

Contenido de metano y rendimiento para el R123 con condición de entrada al expansor a 350kPa y 160°C

Contenido de metano (%)	45%	55%	65%
Rendimiento de biogás (W/m³)	2745,5	3367,7	3990,2
Flujo biogás (m³/h)	0,7	0,6	0,5
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	64,5	79,1	93,7

Figura 2K.

Ciclo del R123 con 45% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

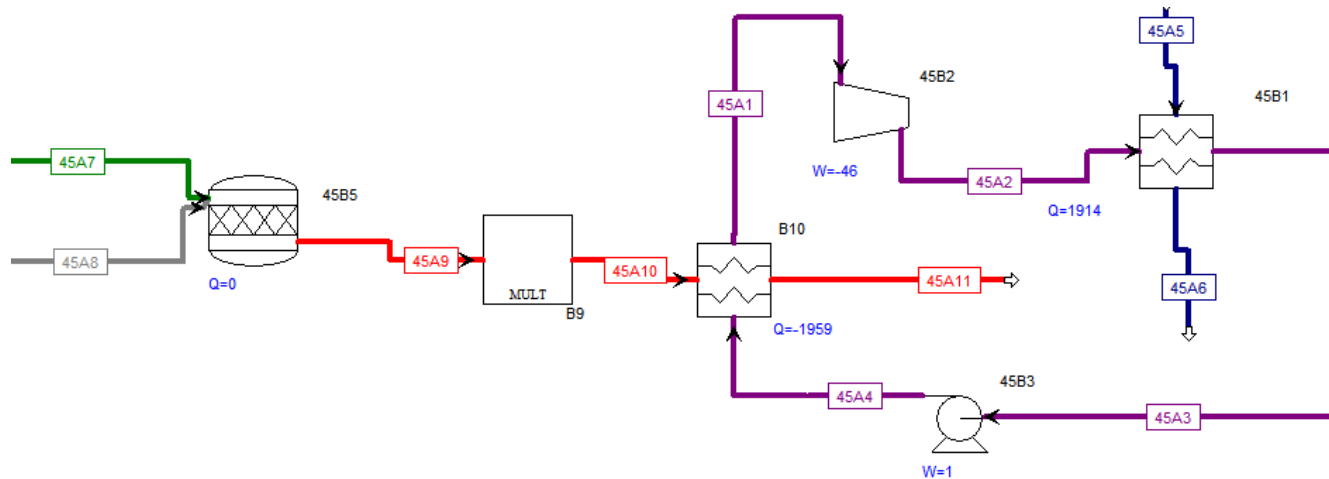


Tabla 4K.

Resultados del R123 con 45% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	45A1	45A2	45A3	45A4	45A5	45A6	45A7	45A8	45A9	45A10	45A11
T (K)	433,15	423,459	307,15	307,255	297,15	302,267	297,15	297,15	1848,35	1848,35	473,379
P (kPa)	350	175,969	175,969	350	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4767,03	-4773,24	-5028,79	-5028,63	-15870,2	-15848,8	-7956,32	-1,21971	-1372,84	-1372,84	-3162,86
s (kJ/kg K)	-1,44	-1,42	-2,19	-2,19	-9,07	-9,00	-0,90	0,18	2,33	2,33	0,60
m (kmol/s)	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,97E-03	4,97E-03	7,23E-06	3,78E-05	4,51E-05	3,74E-05	3,74E-05
M (kg/s)	7,49E-03	7,49E-03	7,49E-03	7,49E-03	8,95E-02	8,95E-02	2,27E-04	1,09E-03	1,32E-03	1,09E-03	1,09E-03
(m³/s)	4,83E-04	9,58E-04	5,20E-06	5,20E-06	8,97E-05	8,98E-05	1,98E-04	1,04E-03	7,70E-03	6,39E-03	1,64E-03

Figura 3K.

Esquema del ciclo del R123 con 55% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

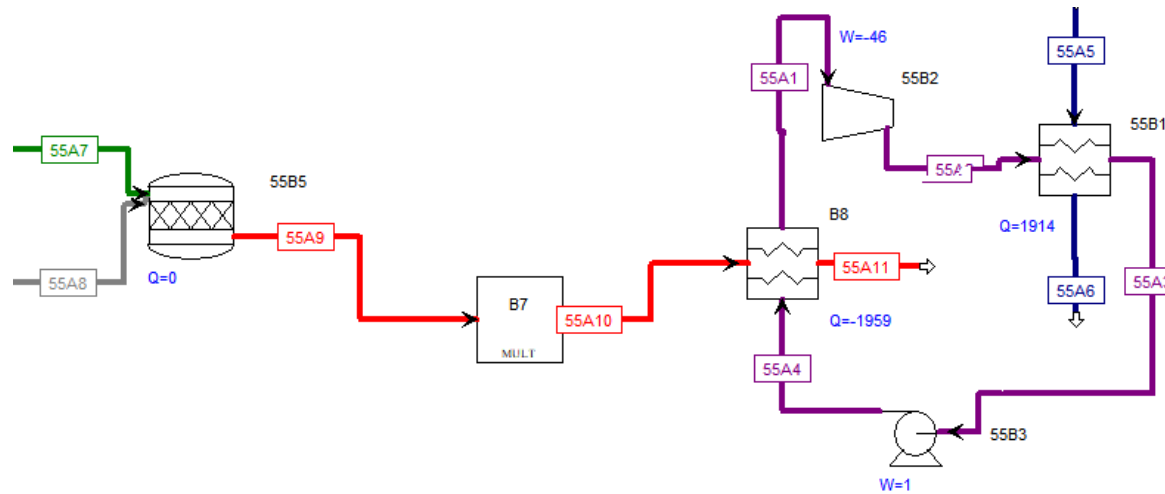


Tabla 5K.

Resultados del R123 con 55% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	55A1	55A2	55A3	55A4	55A5	55A6	55A7	55A8	55A9	55A10	55A11
T (K)	433,15	423,459	307,15	307,255	297,15	302,267	297,15	297,15	1908,16	1908,16	473,517
P (kPa)	350	175,969	175,969	350	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4767,03	-4773,24	-5028,79	-5028,63	-15870,2	-15848,8	-7619,24	-1,21971	-1025,02	-1025,02	-2904,2
s (kJ/kg K)	-1,44	-1,42	-2,19	-2,19	-9,07	-9,00	-1,27	0,18	2,36	2,36	0,59
m (kmol/s)	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,97E-03	4,97E-03	5,90E-06	3,77E-05	4,36E-05	3,62E-05	3,62E-05
M (kg/s)	7,49E-03	7,49E-03	7,49E-03	7,49E-03	8,95E-02	8,95E-02	1,69E-04	1,09E-03	1,26E-03	1,04E-03	1,04E-03
(m ³ /s)	4,83E-04	9,58E-04	5,20E-06	5,20E-06	8,97E-05	8,98E-05	1,62E-04	1,04E-03	7,69E-03	6,38E-03	1,58E-03

Figura 4K.

Esquema del ciclo del R123 con 65% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

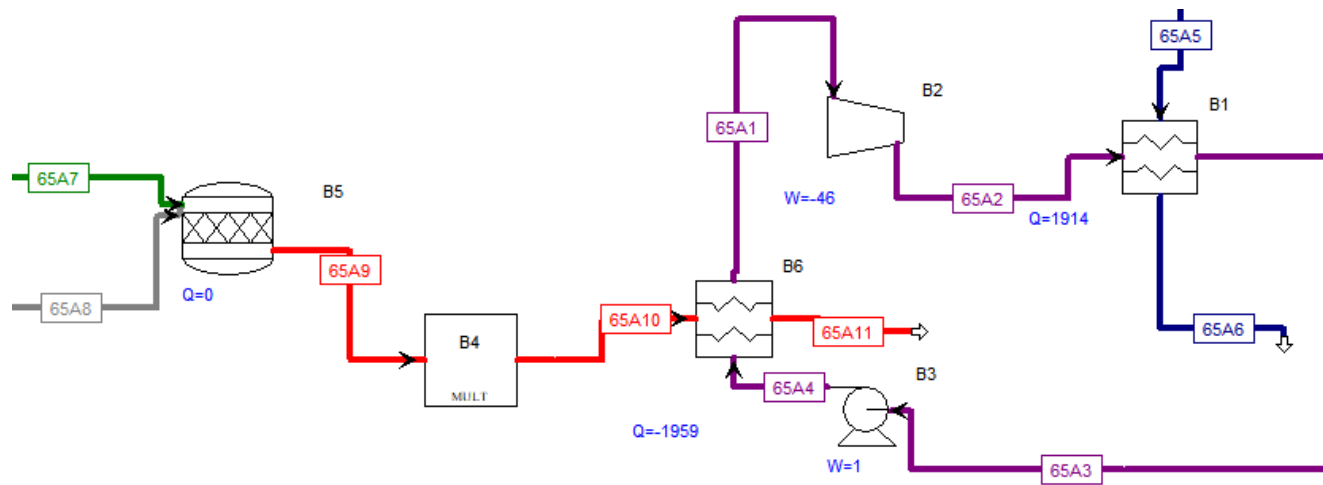


Tabla 6K.

Resultados del R123 con 65% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	65A1	65A2	65A3	65A4	65A5	65A6	65A7	65A8	65A9	65A10	65A11
T (K)	433,15	423,459	307,15	307,255	297,15	302,267	297,15	297,15	1952,3	1952,3	473,355
P (kPa)	350	175,969	175,969	350	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4767,03	-4773,24	-5028,79	-5028,63	-15870,2	-15848,8	-7209,18	-1,21971	-764,84	-764,84	-2710,56
s (kJ/kg K)	-1,44	-1,42	-2,19	-2,19	-9,07	-9,00	-1,75	0,18	2,39	2,39	0,58
m (kmol/s)	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,97E-03	4,97E-03	4,98E-06	3,76E-05	4,26E-05	3,53E-05	3,53E-05
M (kg/s)	7,49E-03	7,49E-03	7,49E-03	7,49E-03	8,95E-02	8,95E-02	1,29E-04	1,08E-03	1,21E-03	1,01E-03	1,01E-03
m ³ /s)	4,83E-04	9,58E-04	5,20E-06	5,20E-06	8,97E-05	8,98E-05	1,36E-04	1,03E-03	7,69E-03	6,38E-03	1,55E-03

Apéndice L Complemento de resultados objetivo 1 de ciclos con R245FA

Tabla 1L.

Resultados para los ciclos del R245FA con condición de entrada al expansor a 350kPa y 160°C

Flujo másico del fluido de trabajo (kg/h)	23,38
Trabajo del expansor (W)	16
Trabajo de la bomba (W)	1
Calor suministrado (W)	2031
Calor cedido (W)	2015
Eficiencia (%)	0,74

Figura 1L.

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del R245FA con condición de entrada al expansor a 350kPa y 160°C

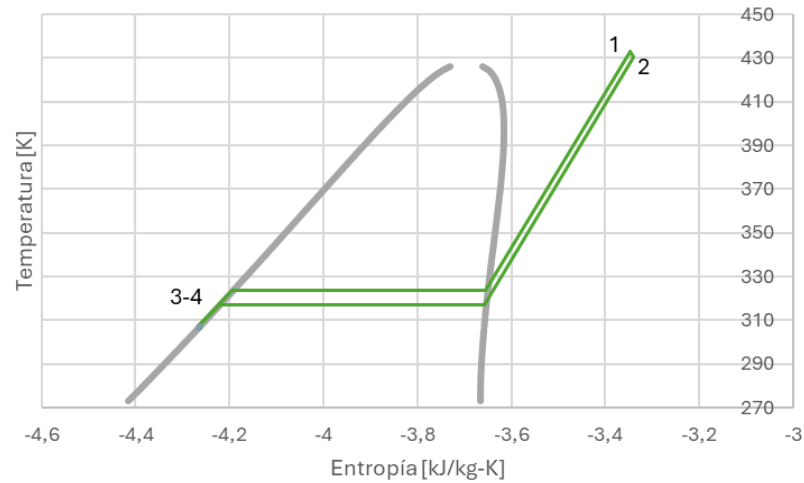


Tabla 2L.

Variables termodinámicas del ciclo del R245FA con condición de entrada al expansor a 350kPa y 160°C

Etapa	Temperatura (K)	Presión (kPa)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg)				
Calentamiento y sobrecalentamiento	T4	307,2	P4	350	h4	-8940	s4	-4,265
	T1	433,2	P1	350	h1	-8630	s1	-3,347
Expansión	T1	433,2	P1	350	h1	-8630	s1	-3,347
	T2	430,4	P2	285,2	h2	-8630	s2	-3,341
Condensación	T2	430,4	P2	285,2	h2	-8630	s2	-3,341
	T3	307,2	P3	285,2	h3	-8940	s3	-4,265
Compresión	T3	307,2	P3	285,2	h3	-8940	s3	-4,265
	T4	307,2	P4	350	h4	-8940	s4	-4,265

Tabla 3L.

Contenido de metano y rendimiento para el R245FA con condición de entrada al expansor a 350kPa y 160°C

Contenido de metano (%)	45	55	65
Flujo biogas (m³/h)	0,74	0,60	0,51
Rendimiento de biogás (W/m³)	2746	3369	3991
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	21,6	26,5	31,4

Figura 2L.

Ciclo del R245FA con 45% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

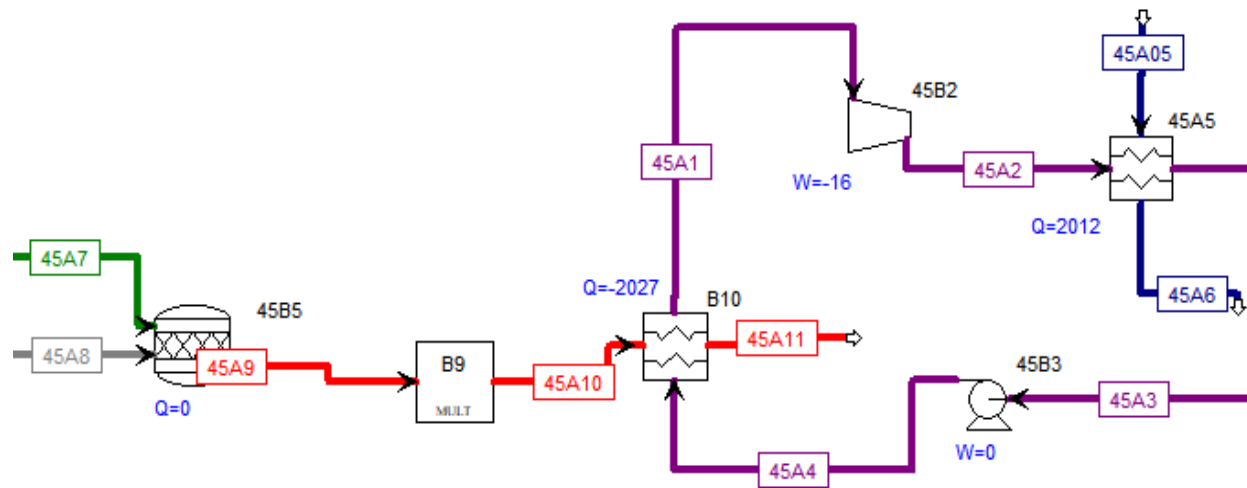


Tabla 4L.

Resultados del R245FA con 45% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	45A1	45A2	45A3	45A4	45A5	45A6	45A7	45A8	45A9	45A10	45A11
T (K)	433,15	430,448	307,15	307,186	297,15	302,288	297,15	297,15	1848,43	1848,43	473,38338
P (kPa)	350	285,223	285,223	350	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-8630	-8630	-8940	-8940	-15900	-15800	-7960	-1,22	-1370	-1370	-3160
s (kJ/kg K)	-3,35	-3,34	-4,27	-4,27	-9,07	-9,00	-0,90	0,18	2,33	2,33	0,60
m (kmol/s)	4,84E-05	4,84E-05	4,84E-05	4,84E-05	5,21E-03	5,21E-03	7,50E-06	3,92E-05	4,67E-05	3,88E-05	3,88E-05
M (kg/s)	6,49E-03	6,49E-03	6,49E-03	6,49E-03	9,38E-02	9,38E-02	2,36E-04	1,13E-03	1,37E-03	1,13E-03	1,13E-03
V (m ³ /s)	4,83E-04	5,92E-04	4,94E-06	4,94E-06	9,41E-05	9,42E-05	2,05E-04	1,08E-03	7,98E-03	6,63E-03	1,70E-03

Figura 3L.

Esquema del ciclo del R245FA con 55% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

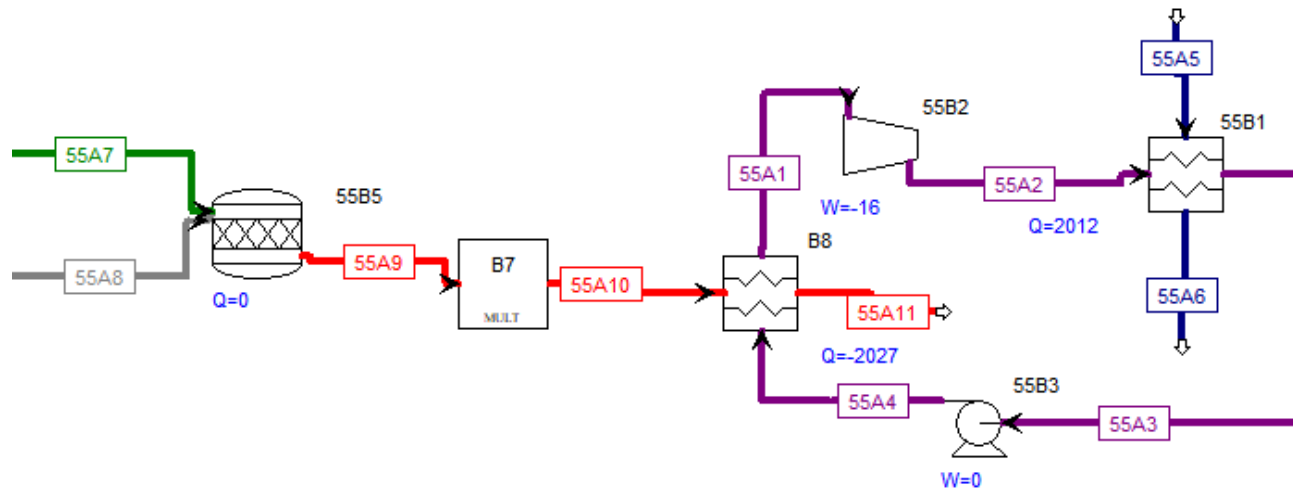


Tabla 5L.

Resultados del R245FA con 55% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	55A1	55A2	55A3	55A4	55A5	55A6	55A7	55A8	55A9	55A10	55A11
T (K)	433,15	430,448	307,15	307,186	297,15	302,288	297,15	297,15	1908,07	1908,07	473,475
P (kPa)	350	285,223	285,223	350	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-8629,02	-8631,41	-8941,74	-8941,67	-15870,2	-15848,7	-7619,24	-1,21971	-1024,95	-1024,95	-2904,02
s (kJ/kg K)	-3,35	-3,34	-4,27	-4,27	-9,07	-9,00	-1,27	0,18	2,36	2,36	0,59
m (kmol/s)	4,84E-05	4,84E-05	4,84E-05	4,84E-05	5,21E-03	5,21E-03	6,11E-06	3,91E-05	4,52E-05	3,75E-05	3,75E-05
M (kg/s)	6,49E-03	6,49E-03	6,49E-03	6,49E-03	9,38E-02	9,38E-02	1,75E-04	1,13E-03	1,30E-03	1,08E-03	1,08E-03
	E-04	5,92E-04	4,94E-06	4,94E-06	9,41E-05	9,42E-05	1,67E-04	1,07E-03	7,97E-03	6,62E-03	1,64E-03

Figura 4L.

Esquema del ciclo del R245FA con 65% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

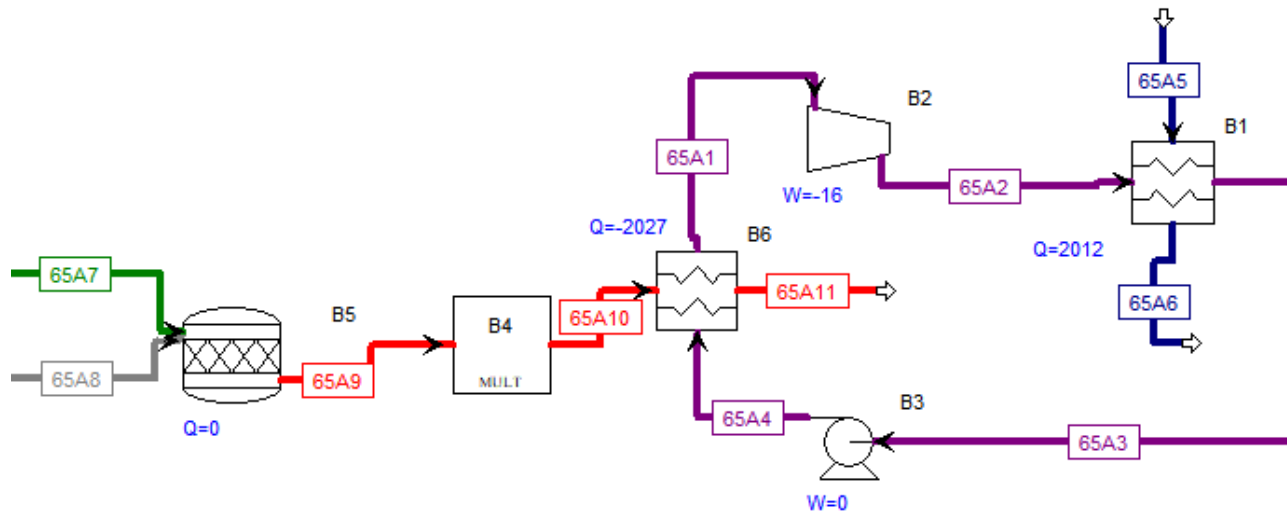


Tabla 6L.

Resultados del R245FA con 65% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	65A1	65A2	65A3	65A4	65A5	65A6	65A7	65A8	65A9	65A10	65A11
T (K)	433,15	430,448	307,15	307,186	297,15	302,288	297,15	297,15	1952,23	1952,23	473,514
P (kPa)	350	285,223	285,223	350	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-8629,02	-8631,41	-8941,74	-8941,67	-15870,2	-15848,7	-7209,18	-1,21971	-764,8	-764,8	-2710,23
s (kJ/kg K)	-3,35	-3,34	-4,27	-4,27	-9,07	-9,00	-1,75	0,18	2,39	2,39	0,58
m (kmol/s)	4,84E-05	4,84E-05	4,84E-05	4,84E-05	5,21E-03	5,21E-03	5,16E-06	3,90E-05	4,41E-05	3,66E-05	3,66E-05
M (kg/s)	6,49E-03	6,49E-03	6,49E-03	6,49E-03	9,38E-02	9,38E-02	1,33E-04	1,12E-03	1,26E-03	1,04E-03	1,04E-03
)	4,83E-04	5,92E-04	4,94E-06	4,94E-06	9,41E-05	9,42E-05	1,41E-04	1,07E-03	7,97E-03	6,61E-03	1,60E-03

Apéndice M Complemento objetivo 1 de ciclo con R123 a condiciones optimizadas

Tabla 1M.

Resultados para el ciclo del R123 con el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas

Flujo másico del fluido de trabajo (kg/h)	26,96
Trabajo del expansor (W)	107
Trabajo de la bomba (W)	7
Calor suministrado (W)	1648
Calor cedido (W)	1549
Eficiencia (%)	6,1

Figura 1M.

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del R123 a condiciones iniciales y condiciones optimizadas

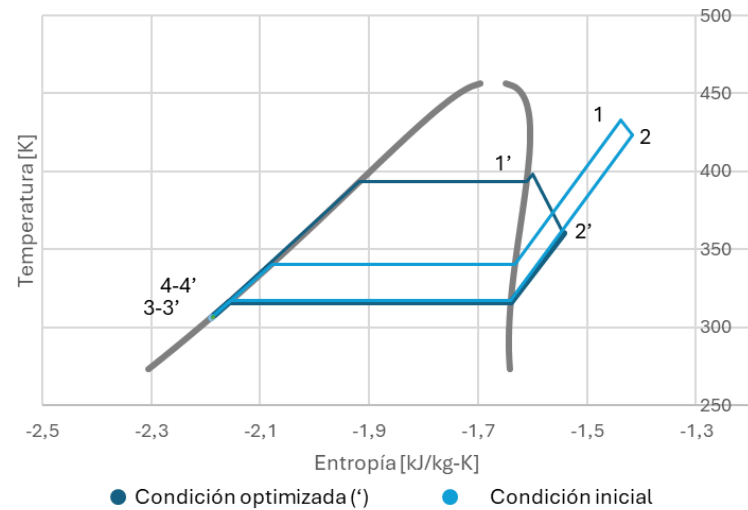


Tabla 2M.

Variables termodinámicas del ciclo R123 para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas

Etapa	Temperatura (K)	Presión (kPa)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg)				
Evaporación y sobrecalentamiento	T4	306,8	P4	1200,0	h4	-5028,87	s4	-2,190
	T1	398,2	P1	1200,0	h1	-4808,75	s1	-1,600
Expansión	T1	398,2	P1	1200,0	h1	-4808,75	s1	-1,600
	T2	360,2	P2	170,4	h2	-4823,01	s2	-1,543
Condensación	T2	360,2	P2	170,4	h2	-4823,01	s2	-1,543
	T3	306,2	P3	170,4	h3	-5029,82	s3	-2,191
Compresión	T3	306,2	P3	170,4	h3	-5029,82	s3	-2,191
	T4	306,8	P4	1200,0	h4	-5028,87	s4	-2,190

Tabla 3M.

Contenido de metano y rendimiento para R123 para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas

Contenido de metano (%)	45,0	55,0	65,0
Flujo biogas (m³/h)	0,60	0,49	0,41
Rendimiento de biogás (W/m³)	2744,8	3366,7	3989,1
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	178,21	218,59	259,00

Figura 2M.

Ciclo del R123 para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas con 45% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

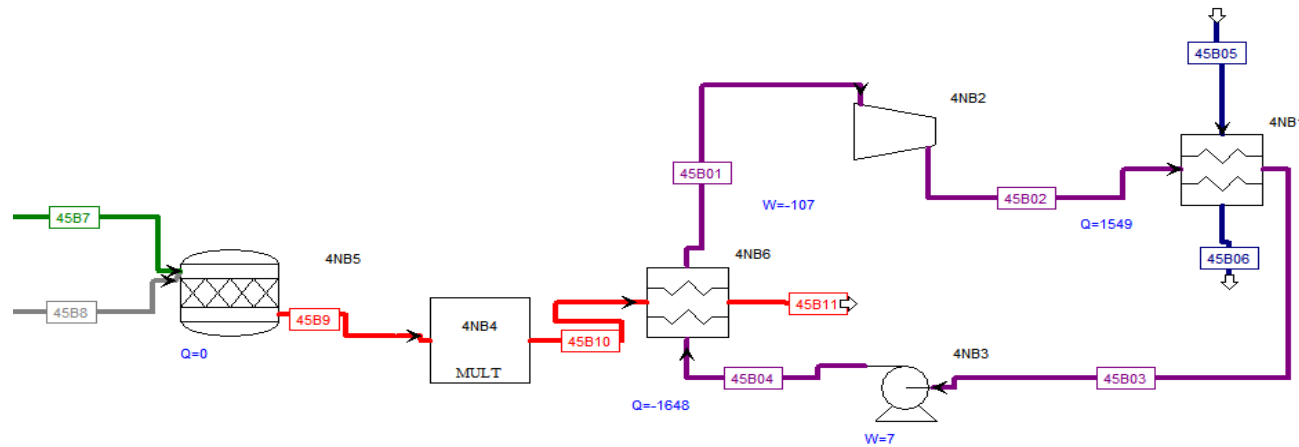


Tabla 4M.

Resultados del R123 para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas con 45% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	45B1	45B2	45B3	45B4	45B5	45B6	45B7	45B8	45B9	45B10	45B11
T (K)	398,15	360,21	306,15	306,765	297,15	301,592	297,15	297,15	1848,31	1848,31	473,348
P (kPa)	1200	170,39	170,39	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4808,75	-4823,01	-5029,82	-5028,87	-15870,2	-15851,6	-7956,32	-1,21971	-1372,79	-1372,79	-3162,79
s (kJ/kg K)	-1,60	-1,54	-2,19	-2,19	-9,07	-9,01	-0,90	0,18	2,33	2,33	0,60
m (kmol/s)	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,63E-03	4,63E-03	6,09E-06	3,18E-05	3,79E-05	3,15E-05	3,15E-05
M (kg/s)	7,49E-03	7,49E-03	7,49E-03	7,49E-03	8,34E-02	8,34E-02	1,91E-04	9,18E-04	1,11E-03	9,21E-04	9,21E-04
m ³ /s)	1,05E-04	8,28E-04	5,19E-06	5,18E-06	8,36E-05	8,37E-05	1,67E-04	8,74E-04	6,48E-03	5,38E-03	1,38E-03

Figura 3M.

Ciclo del R123 para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas con 55% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

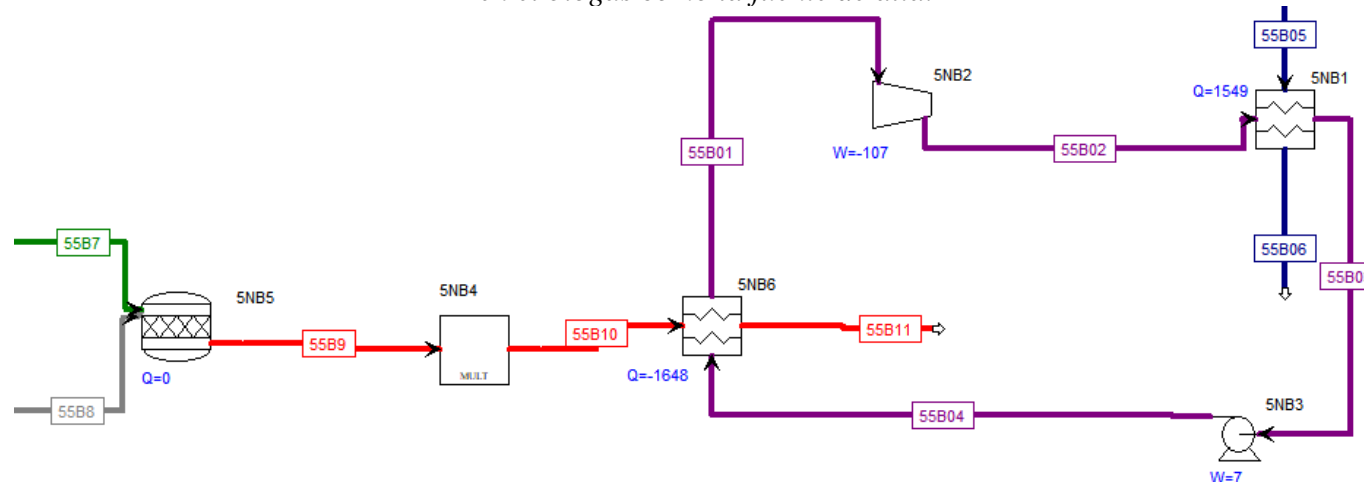


Tabla 5M.

Resultados del R123 para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas con 55% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	55B1	55B2	55B3	55B4	55B5	55B6	55B7	55B8	55B9	55B10	55A11
T (K)	398,15	360,21	306,15	306,765	297,15	301,592	297,15	297,15	1908,11	1908,11	473,539
P (kPa)	1200	170,39	170,39	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4808,75	-4823,01	-5029,82	-5028,87	-15870,2	-15851,6	-7619,24	-1,21971	-1024,98	-1024,98	-2904,06
s (kJ/kg K)	-1,60	-1,54	-2,19	-2,19	-9,07	-9,01	-1,27	0,18	2,36	2,36	0,59
m (kmol/s)	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,63E-03	4,63E-03	4,96E-06	3,17E-05	3,67E-05	3,04E-05	3,04E-05
M (kg/s)	7,49E-03	7,49E-03	7,49E-03	7,49E-03	8,34E-02	8,34E-02	1,42E-04	9,15E-04	1,06E-03	8,77E-04	8,77E-04
(m ³ /s)	1,05E-04	8,28E-04	5,19E-06	5,18E-06	8,36E-05	8,37E-05	1,36E-04	8,71E-04	6,47E-03	5,37E-03	1,33E-03

Figura 4M.

Ciclo del R123 para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas con 65% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

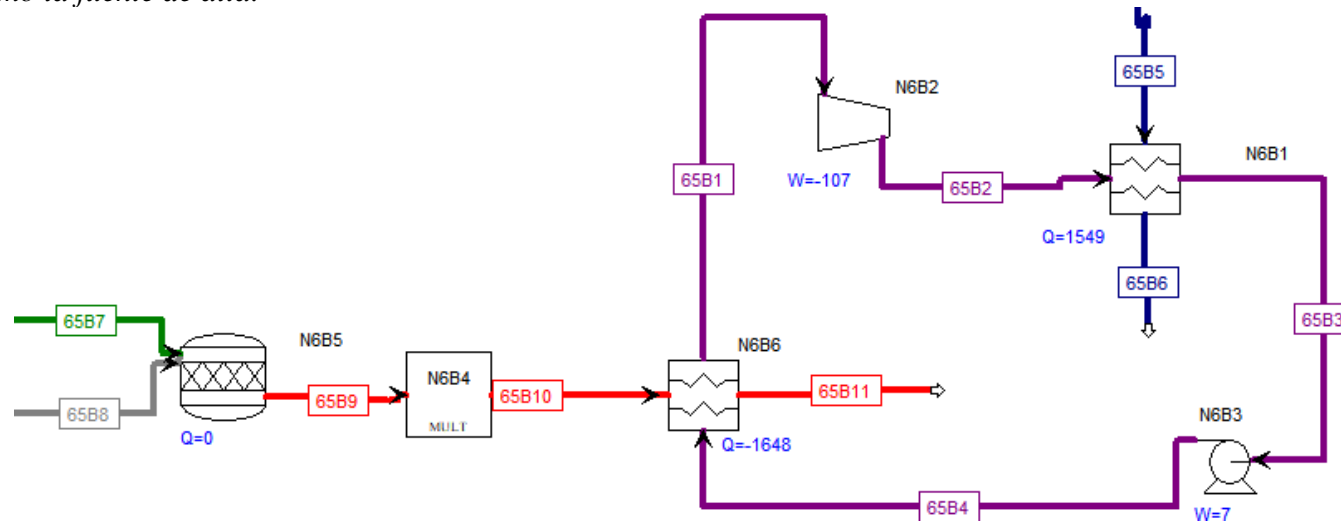


Tabla 6M.

Resultados del R123 para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas con 65% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	65B1	65B2	65B3	65B4	65B5	65B6	65B7	65B8	65B9	65B10	65A11
T (K)	398,15	360,21	306,15	306,765	297,15	301,592	297,15	297,15	1952,34	1952,34	473,346
P (kPa)	1200	170,39	170,39	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4808,75	-4823,01	-5029,82	-5028,87	-15870,2	-15851,6	-7209,18	-1,21971	-764,86	-764,86	-2710,65
s (kJ/kg K)	-1,60	-1,54	-2,19	-2,19	-9,07	-9,01	-1,75	0,18	2,39	2,39	0,58
m (kmol/s)	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,90E-05	4,63E-03	4,63E-03	4,19E-06	3,16E-05	3,58E-05	2,97E-05	2,97E-05
M (kg/s)	7,49E-03	7,49E-03	7,49E-03	7,49E-03	8,34E-02	8,34E-02	1,08E-04	9,13E-04	1,02E-03	8,47E-04	8,47E-04
m³/s)	1,05E-04	8,28E-04	5,19E-06	5,18E-06	8,36E-05	8,37E-05	1,15E-04	8,69E-04	6,47E-03	5,37E-03	1,30E-03

Apéndice N Complemento objetivo 1 de ciclo con R245FA a condiciones optimizadas

Tabla 1N.

Resultados para el ciclo del R245fa para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas

Flujo másico del fluido de trabajo (kg/h)	23,38
Trabajo del expansor (W)	104
Trabajo de la bomba (W)	6
Calor suministrado (W)	1737
Calor cedido (W)	1639
Eficiencia (%)	5,6

Figura 1N.

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del R245fa con condición de entrada al expansor a 350kpa y 160°C y con las condiciones optimizadas del expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW



Tabla 2N.

Variables termodinámicas del ciclo R245fa para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas

Etapas	Temperatura (K)		Presión (kPa)		Entalpía (kJ/kg)		Entropía (kJ/kg)	
Evaporación y sobrecalentamiento	T4	300,7	P4	1200,0	h4	-8950,12	s4	-4,295
	T1	395,2	P1	1200,0	h1	-8682,72	s1	-3,548
Expansión	T1	395,2	P1	1200,0	h1	-8682,72	s1	-3,548
	T2	366,2	P2	226,6	h2	-8698,76	s2	-3,496
Condensación	T2	366,2	P2	226,6	h2	-8698,76	s2	-3,496
	T3	300,2	P3	226,6	h3	-8951,09	s3	-4,296
Compresión	T3	300,2	P3	226,6	h3	-8951,09	s3	-4,296
	T4	300,7	P4	1200,0	h4	-8950,12	s4	-4,295

Tabla 3N.

Contenido de metano y rendimiento para R245fa para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas

Contenido de metano (%)	45,0	55,0	65,0
Flujo biogas (m³/h)	0,63	0,52	0,44
Rendimiento de biogás (W/m³)	2746,2	3368,7	3991,2
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	164,43	201,70	238,97

Figura 2N.

Ciclo del R245fa para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas con 45% de Metano en el biogás como la fuente de alta

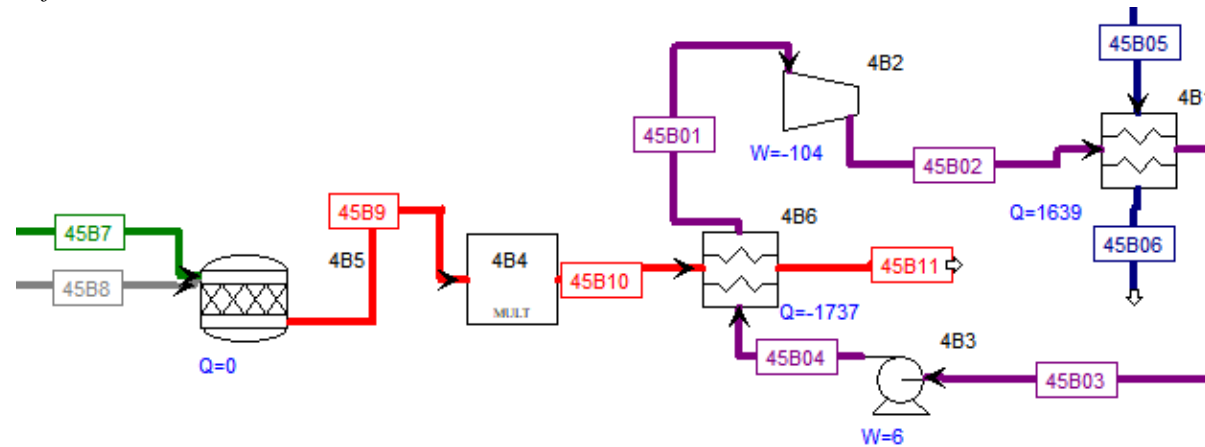


Tabla 4N.

Resultados del R245fa para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas con 45% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	45A1	45A2	45A3	45A4	45A5	45A6	45A7	45A8	45A9	45A10	45A11
T (K)	395,15	366,208	300,15	300,673	297,15	298,596	297,15	297,15	1848,29	1848,29	473,297
P (kPa)	1200	226,612	226,612	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-8682,72	-8698,76	-8951,09	-8950,12	-15870,2	-15864,1	-7956,32	-1,21971	-1372,77	-1372,77	-3162,79
s (kJ/kg K)	-3,55	-3,50	-4,30	-4,29	-9,07	-9,05	-0,90	0,18	2,33	2,33	0,60
m (kmol/s)	4,84E-05	4,84E-05	4,84E-05	4,84E-05	1,50E-02	1,50E-02	6,41E-06	3,35E-05	3,99E-05	3,32E-05	3,32E-05
M (kg/s)	6,49E-03	6,49E-03	6,49E-03	6,49E-03	2,71E-01	2,71E-01	2,02E-04	9,67E-04	1,17E-03	9,70E-04	9,70E-04
V (m ³ /s)	1,10E-04	6,26E-04	4,87E-06	4,86E-06	2,72E-04	2,72E-04	1,76E-04	9,21E-04	6,83E-03	5,67E-03	1,45E-03

Figura 3N.

Ciclo del R245fa para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas con 55% de Metano en el biogás como la fuente de alta

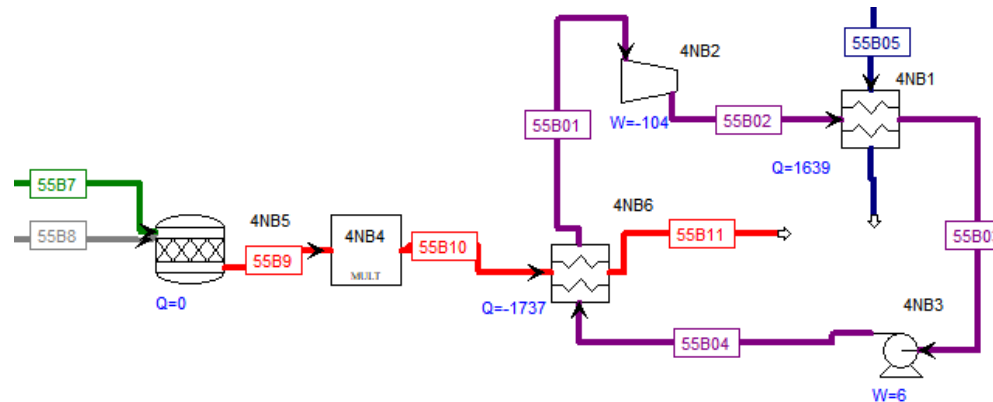


Tabla 5N.

Resultados del R245fa para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas con 55% de Metano en el biogás como la fuente de alta

Corriente	55A1	55A2	55A3	55A4	55A5	55A6	55A7	55A8	55A9	55A10	55A11
T (K)	395,15	366,208	300,15	300,673	297,15	298,596	297,15	297,15	1908,2	1908,2	473,397
P (kPa)	1200	226,612	226,612	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-8682,72	-8698,76	-8951,09	-8950,12	-15870,2	-15864,1	-7619,24	-1,21971	-1025,06	-1025,06	-2904,43
s (kJ/kg K)	-3,55	-3,50	-4,30	-4,29	-9,07	-9,05	-1,27	0,18	2,36	2,36	0,59
m (kmol/s)	4,84E-05	4,84E-05	4,84E-05	4,84E-05	1,50E-02	1,50E-02	5,23E-06	3,34E-05	3,86E-05	3,21E-05	3,21E-05
M (kg/s)	6,49E-03	6,49E-03	6,49E-03	6,49E-03	2,71E-01	2,71E-01	1,50E-04	9,64E-04	1,11E-03	9,24E-04	9,24E-04
V (m³/s)	1,10E-04	6,26E-04	4,87E-06	4,86E-06	2,72E-04	2,72E-04	1,43E-04	9,17E-04	6,82E-03	5,66E-03	1,40E-03

Figura 4N.

Ciclo del R245fa para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas con 65% de Metano en el biogás como la fuente de alta

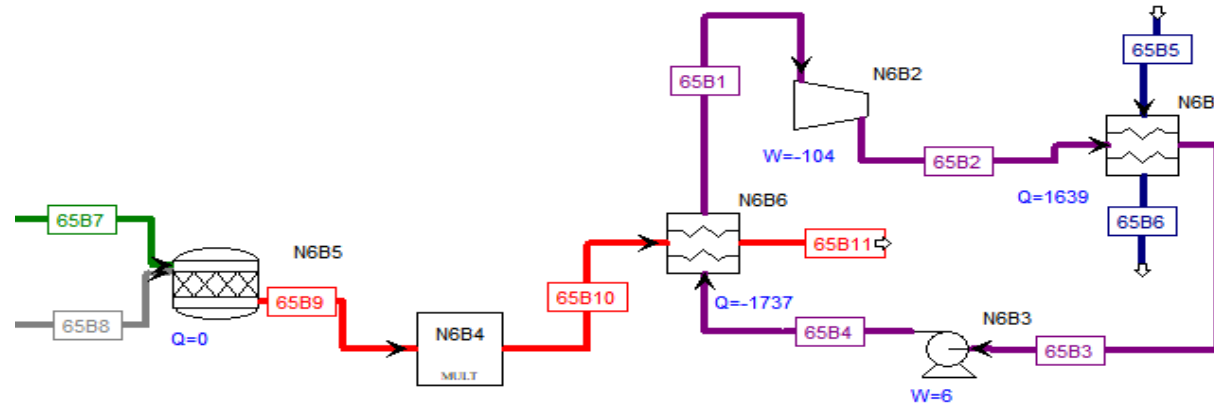


Tabla 6N.

Resultados del R245fa para el expansor E15H022A-SH Scroll Semihermético de 1 kW con las condiciones optimizadas con 65% de Metano en el biogás como la fuente de alta.

Corriente	65B1	65B2	65B3	65B4	65B5	65B6	65B7	65B8	65B9	65B10	65B11
T (K)	395,15	366,208	300,15	300,673	297,15	298,596	297,15	297,15	1952,38	1952,38	473,329
P (kPa)	1200	226,612	226,612	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-8682,72	-8698,76	-8951,09	-8950,12	-15870,2	-15864,1	-7209,18	-1,21971	-764,882	-764,882	-2710,75
s (kJ/kg K)	-3,55	-3,50	-4,30	-4,29	-9,07	-9,05	-1,75	0,18	2,39	2,39	0,58
m (kmol/s)	4,84E-05	4,84E-05	4,84E-05	4,84E-05	1,50E-02	1,50E-02	4,41E-06	3,33E-05	3,77E-05	3,13E-05	3,13E-05
M (kg/s)	6,49E-03	6,49E-03	6,49E-03	6,49E-03	2,71E-01	2,71E-01	1,14E-04	9,61E-04	1,08E-03	8,92E-04	8,92E-04
V (m³/s)	1,10E-04	6,26E-04	4,87E-06	4,86E-06	2,72E-04	2,72E-04	1,21E-04	9,15E-04	6,81E-03	5,65E-03	1,37E-03

Apéndice O Complemento de resultados objetivo 2 de ciclos con R123**Tabla 10.**

Resultados para el ciclo del R123 para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

Trabajo del expansor (W)	1574,0
Trabajo de la bomba (W)	105,0
Calor suministrado (W)	24295,0
Calor cedido (W)	22826,0
Eficiencia (%)	6,0
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	295,13

Figura 10.

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del R123 para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

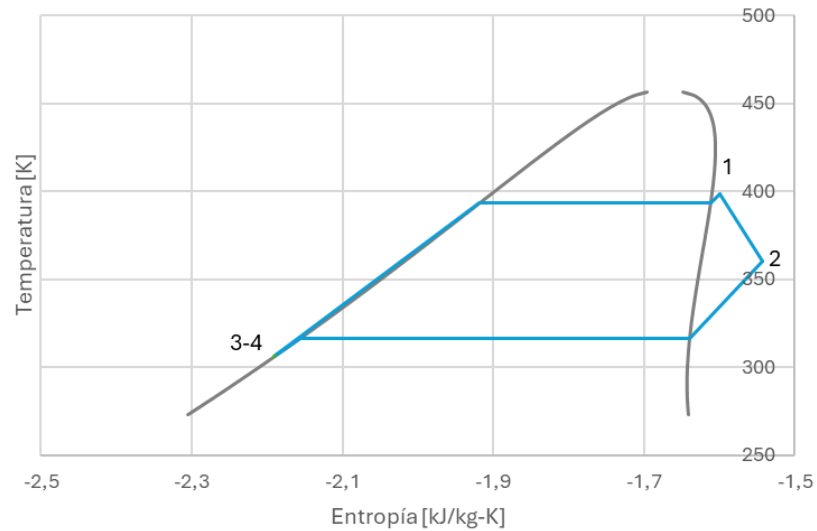


Tabla 20.

Variables termodinámicas del ciclo del R123 para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

Etapa	Temperatura (K)	Presión (kPa)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg)				
Evaporación y sobrecalentamiento	T4	306,8	P4	1200	h4	-5028,87	s4	-2,190
	T1	398,2	P1	1200	h1	-4808,75	s1	-1,600
Expansión	T1	398,2	P1	1200	h1	-4808,75	s1	-1,600
	T2	360,2	P2	170,4	h2	-4823,01	s2	-1,543
Condensación	T2	360,2	P2	170,4	h2	-4823,01	s2	-1,543
	T3	306,2	P3	170,4	h3	-5029,82	s3	-2,191
Compresión	T3	306,2	P3	170,4	h3	-5029,82	s3	-2,191
	T4	306,8	P4	1200	h4	-5028,87	s4	-2,190

Figura 20.

Ciclo del ciclo del R123 para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

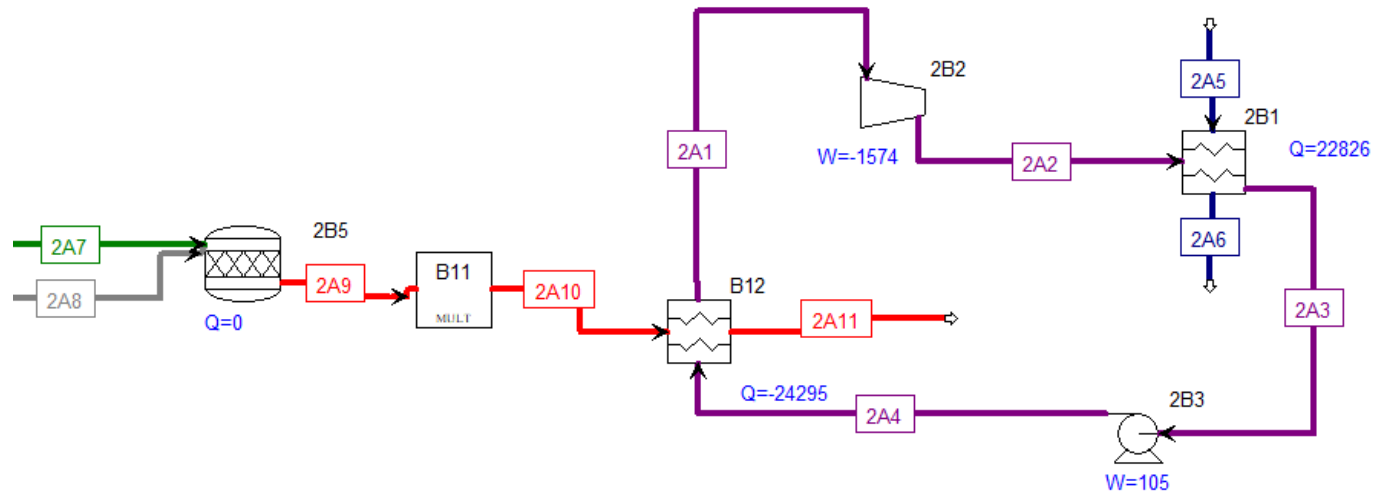


Tabla 30.*Resultados del R123 para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas*

Corriente	2A1	2A2	2A3	2A4	2A5	2A6	2A7	2A8	2A9	2A10	2A11
T (K)	398,15	360,21	306,15	306,765	295,15	308,243	295,15	295,15	1986,75	1986,75	473,192
P (kPa)	1200	170,39	170,39	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4808,75	-4823,01	-5029,82	-5028,87	-15878,6	-15823,8	-6873,85	-3,2452	-628,234	-628,234	-2627,44
s (kJ/kg K)	-1,60	-1,54	-2,19	-2,19	-9,10	-8,92	-2,16	0,17	2,41	2,41	0,57
m (kmol/s)	7,22E-04	7,22E-04	7,22E-04	7,22E-04	2,31E-02	2,31E-02	5,44E+09	4,50E-04	5,05E-04	4,29E-04	4,29E-04
M (kg/s)	1,10E-01	1,10E-01	1,10E-01	1,10E-01	4,17E-01	4,17E-01	1,30E-03	1,30E-02	1,43E-02	1,22E-02	1,22E-02
V (m³/s)	1,55E-03	1,22E-02	7,65E+09	7,64E+09	4,18E-04	4,20E-04	1,48E-03	1,23E-02	9,28E-02	7,88E-02	1,88E-02

Apéndice P Complemento de resultados objetivo 2 de ciclos con R245FA

Figura 1P.

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del R245fa para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

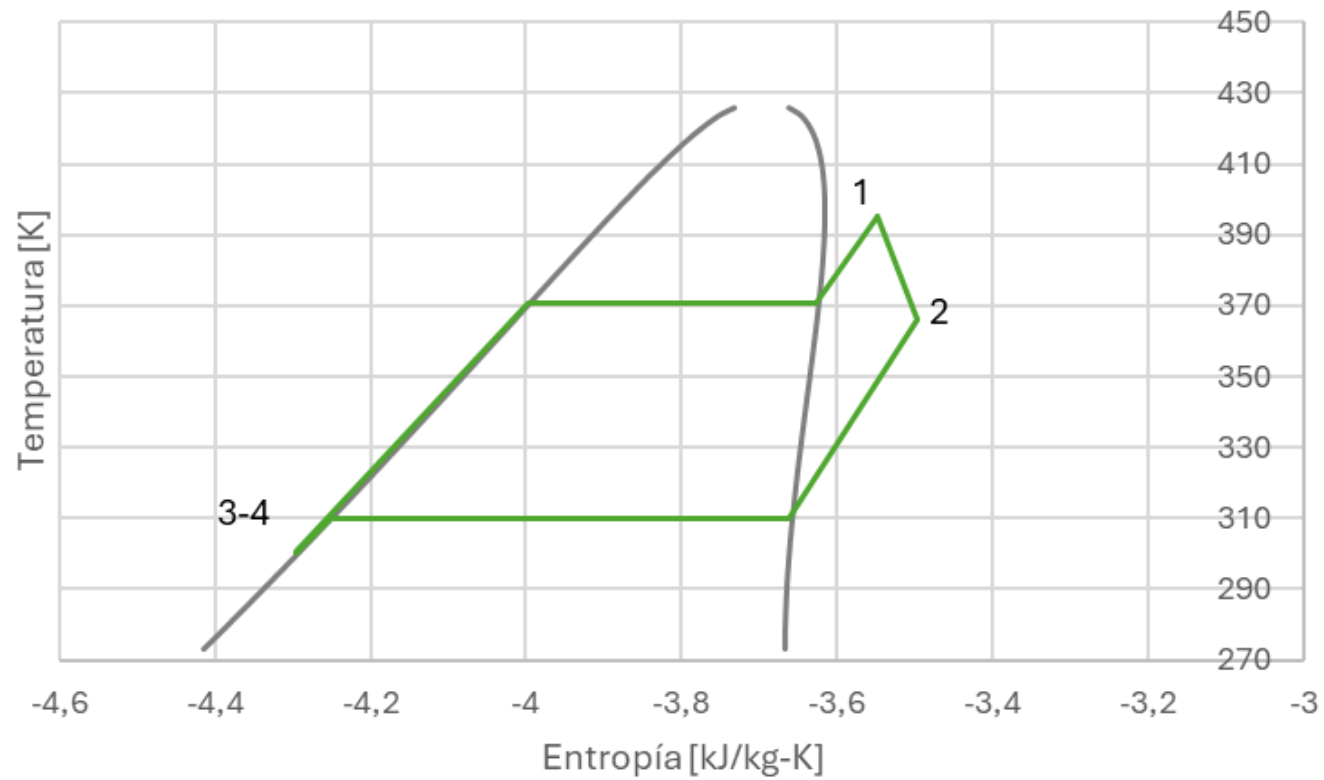


Tabla 1P.

Resultados para el ciclo del R245fa para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

Trabajo del expansor (W)	1423
Trabajo de la bomba (W)	86
Calor suministrado (W)	23724
Calor cedido (W)	22387
Eficiencia (%)	5,64
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	266,81

Tabla 2P.

Variables termodinámicas del ciclo del R245fa para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

Etapa	Temperatura (K)	Presión (kPa)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg)
Evaporación y sobrecalentamiento	T4 300,7	P4 1200	h4 -8950,12	s4 -4,295
	T1 395,2	P1 1200	h1 -8682,72	s1 -3,548
Expansión	T1 395,2	P1 1200	h1 -8682,72	s1 -3,548
	T2 366,2	P2 226,6	h2 -8698,76	s2 -3,496
Condensación	T2 366,2	P2 226,6	h2 -8698,76	s2 -3,496
	T3 300,2	P3 226,6	h3 -8951,09	s3 -4,296
Compresión	T3 300,2	P3 226,6	h3 -8951,09	s3 -4,296
	T4 300,7	P4 1200	h4 -8950,12	s4 -4,295

Figura 2P.

Ciclo del ciclo del R245fa para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

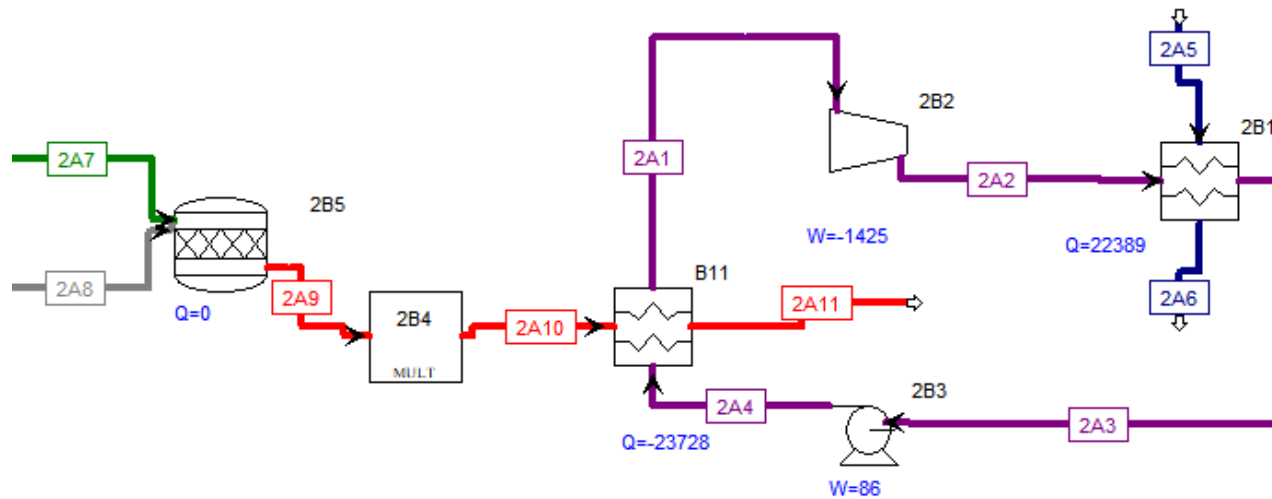


Tabla 3P.

Resultados del R245fa para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

Corriente	2A1	2A2	2A3	2A4	2A5	2A6	2A7	2A8	2A9	2A10	2A11
T (K)	395,15	366,208	300,15	300,673	295,15	308,187	295,15	295,15	1986,75	1986,75	473,163
P (kPa)	1200	226,612	226,612	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-8682,72	-8698,76	-8951,09	-8950,12	-15878,6	-15824,1	-6873,85	-3,2452	-628,234	-628,234	-2627,47
s (kJ/kg K)	-3,55	-3,50	-4,30	-4,29	-9,10	-8,92	-2,16	0,17	2,41	2,41	0,57
m (kmol/s)	6,62E-04	6,62E-04	6,62E-04	6,62E-04	2,28E-02	2,28E-02	5,44E+09	4,50E-04	5,05E-04	4,19E-04	4,19E-04
M (kg/s)	8,87E-02	8,87E-02	8,87E-02	8,87E-02	4,11E-01	4,11E-01	1,30E-03	1,30E-02	1,43E-02	1,19E-02	1,19E-02
V (m ³ /s)	1,50E-03	8,55E-03	6,65E+09	6,65E+09	4,12E-04	4,13E-04	1,48E-03	1,23E-02	9,28E-02	7,70E-02	1,83E-02

Apéndice Q Complemento de resultados objetivo 2 de ciclos con ETANOL**Figura 1Q.**

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del etanol para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

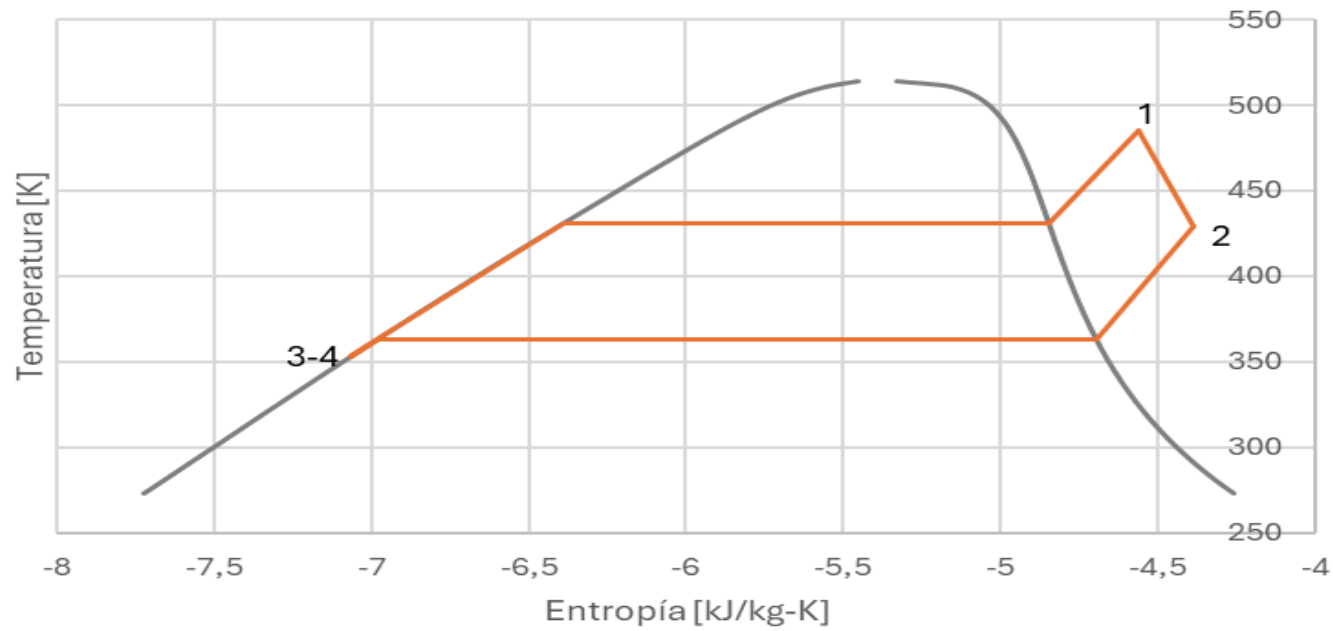


Tabla 1Q.

Variables termodinámicas del ciclo del etanol para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

Etapa	Temperatura (K)	Presión (kPa)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg)				
Evaporación y sobrecalentamiento	T4	353,5	P4	1200	h4	-5872,79	s4	-7,063
	T1	485,2	P1	1200	h1	-4811,45	s1	-4,559
Expansión	T1	485,2	P1	1200	h1	-4811,45	s1	-4,559
	T2	429,1	P2	157,3	h2	-4892,48	s2	-4,386
Condensación	T2	429,1	P2	157,3	h2	-4892,48	s2	-4,386
	T3	353,2	P3	157,3	h3	-5874,68	s3	-7,064
Compresión	T3	353,2	P3	157,3	h3	-5874,68	s3	-7,064
	T4	353,5	P4	1200	h4	-5872,79	s4	-7,063

Tabla 2Q.

Resultados para el ciclo del etanol para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

Trabajo del expansor (W)	1811
Trabajo de la bomba (W)	42
Calor suministrado (W)	23724
Calor cedido (W)	21955
Eficiencia (%)	7,46
Rendimiento del ciclo (R) (W/m ³)	339,5625

Figura 2Q.

Ciclo del ciclo del etanol para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

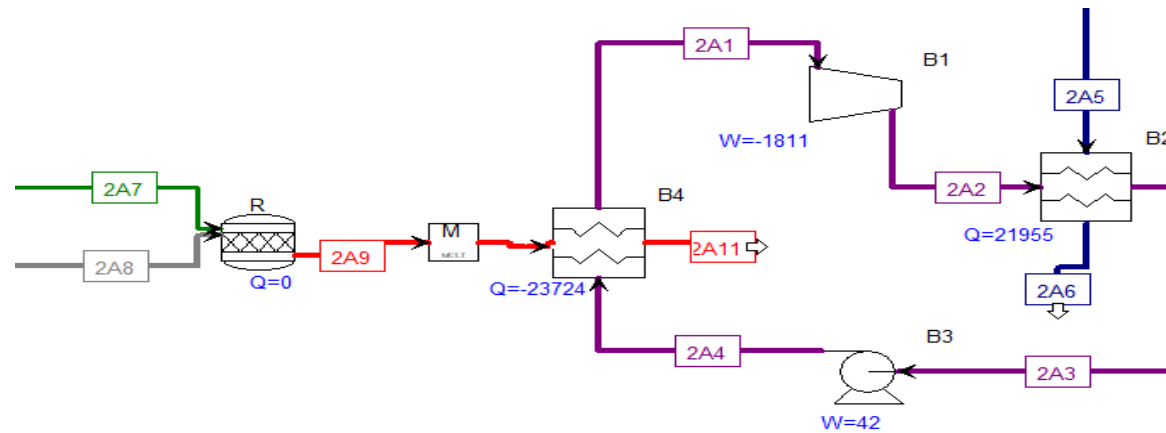


Tabla 2Q.

Resultados para el ciclo del etanol para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

Corriente	2A1	2A2	2A3	2A4	2A5	2A6	2A7	2A8	2A9	2A10	2A11
T (K)	485,15	429,101	353,15	353,541	295,15	308,232	295,15	295,15	1986,75	1986,75	473,166
P (kPa)	1200	157,309	157,309	1200	89,925	100	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4811,45	-4892,48	-5874,68	-5872,79	-15878,6	-15823,9	-6873,85	-3,2452	-628,234	-628,234	-2627,47
s (kJ/kg K)	-4,56	-4,39	-7,06	-7,06	-9,10	-8,92	-2,16	0,17	2,41	2,41	0,57
m (kmol/s)	4,85E-04	4,85E-04	4,85E-04	4,85E-04	2,23E-02	2,23E-02	5,44E+09	4,50E-04	5,05E-04	4,19E-04	4,19E-04
M (kg/s)	2,24E-02	2,24E-02	2,24E-02	2,24E-02	4,01E-01	4,01E-01	1,30E-03	1,30E-02	1,43E-02	1,19E-02	1,19E-02
V (m ³ /s)	1,50E-03	1,08E-02	3,04E+09	3,04E+09	4,02E-04	4,04E-04	1,48E-03	1,23E-02	9,28E-02	7,70E-02	1,83E-02

Apéndice R Complemento de resultados objetivo 2 de ciclos con AGUA**Figura 1Q.**

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del agua para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

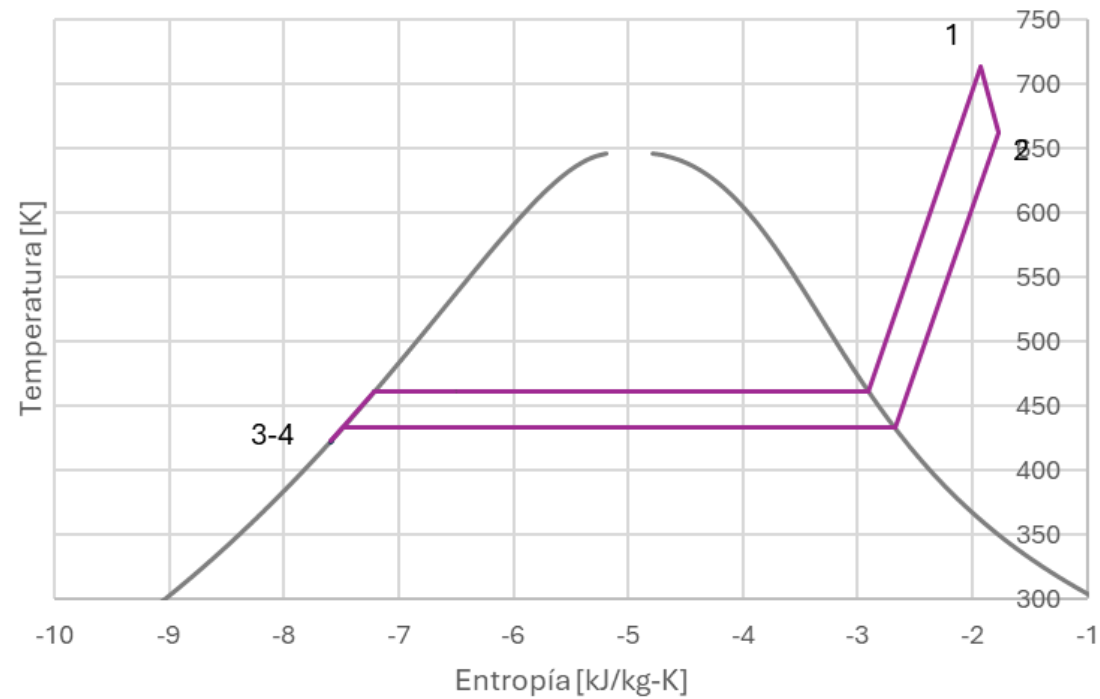


Tabla 1R.

Variables termodinámicas del ciclo del etanol para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

Etapa	Temperatura (K)		Presión (kPa)		Entalpía (kJ/kg)		Entropía (kJ/kg)	
Evaporación y sobrecalentamiento	T4	423,3	P4	1200	h4	-15337,80	s4	-7,586
	T1	713,2	P1	1200	h1	-12623,80	s1	-1,925
Expansión	T1	713,2	P1	1200	h1	-12623,80	s1	-1,925
	T2	662,1	P2	618,2	h2	-12723,70	s2	-1,767
Condensación	T2	662,1	P2	618,2	h2	-12723,70	s2	-1,767
	T3	423,2	P3	618,2	h3	-15338,70	s3	-7,586
Compresión	T3	423,2	P3	618,2	h3	-15338,70	s3	-7,586
	T4	423,3	P4	1200	h4	-15337,80	s4	-7,586

Tabla 2R.

Resultados para el ciclo del agua para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

Trabajo del expansor (W)	874
Trabajo de la bomba (W)	7
Calor suministrado (W)	23724
Calor cedido (W)	22858
Eficiencia (%)	3,65
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	163,88

Figura 2Q.

Ciclo del agua para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

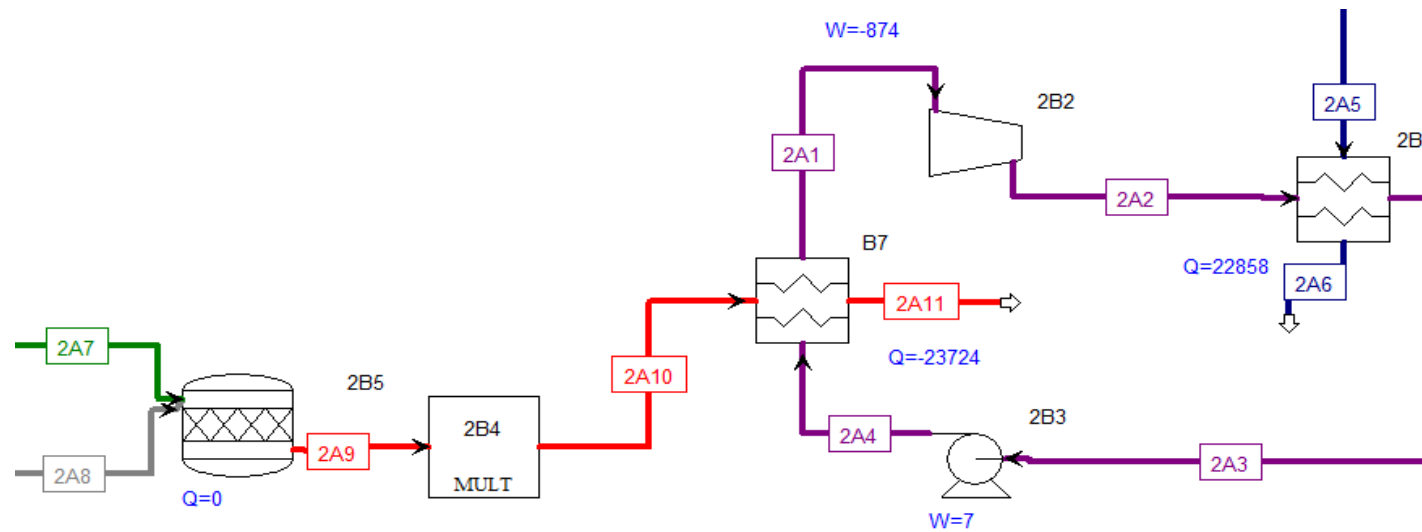


Tabla 3Q.

Resultados del agua para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas

Corriente	2A1	2A2	2A3	2A4	2A5	2A6	2A7	2A8	2A9	2A10	2A11
T (K)	713,15	662,075	423,15	423,263	295,15	308,196	295,15	295,15	1986,73	1986,73	473,157
P (kPa)	1200	618,235	618,235	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-12623,8	-12723,7	-15338,7	-15337,8	-15878,6	-15824	-6873,85	-3,2452	-628,225	-628,225	-2627,44
s (kJ/kg K)	-1,92	-1,77	-7,59	-7,59	-9,10	-8,92	-2,16	0,17	2,41	2,41	0,57
m (kmol/s)	4,85E-04	4,85E-04	4,85E-04	4,85E-04	2,33E-02	2,33E-02	5,44E+09	4,50E-04	5,05E-04	4,19E-04	4,19E-04
M (kg/s)	8,74E-03	8,74E-03	8,74E-03	8,74E-03	4,19E-01	4,19E-01	1,30E-03	1,30E-02	1,43E-02	1,19E-02	1,19E-02
V (m ³ /s)	2,37E-03	4,28E-03	9,53E+08	9,53E+08	4,20E-04	4,22E-04	1,48E-03	1,23E-02	9,28E-02	7,70E-02	1,83E-02

Apéndice S Complemento objetivo 2 de ciclos con R123 empleando regeneración

Figura 1S.

Ciclo del ciclo del R123 para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

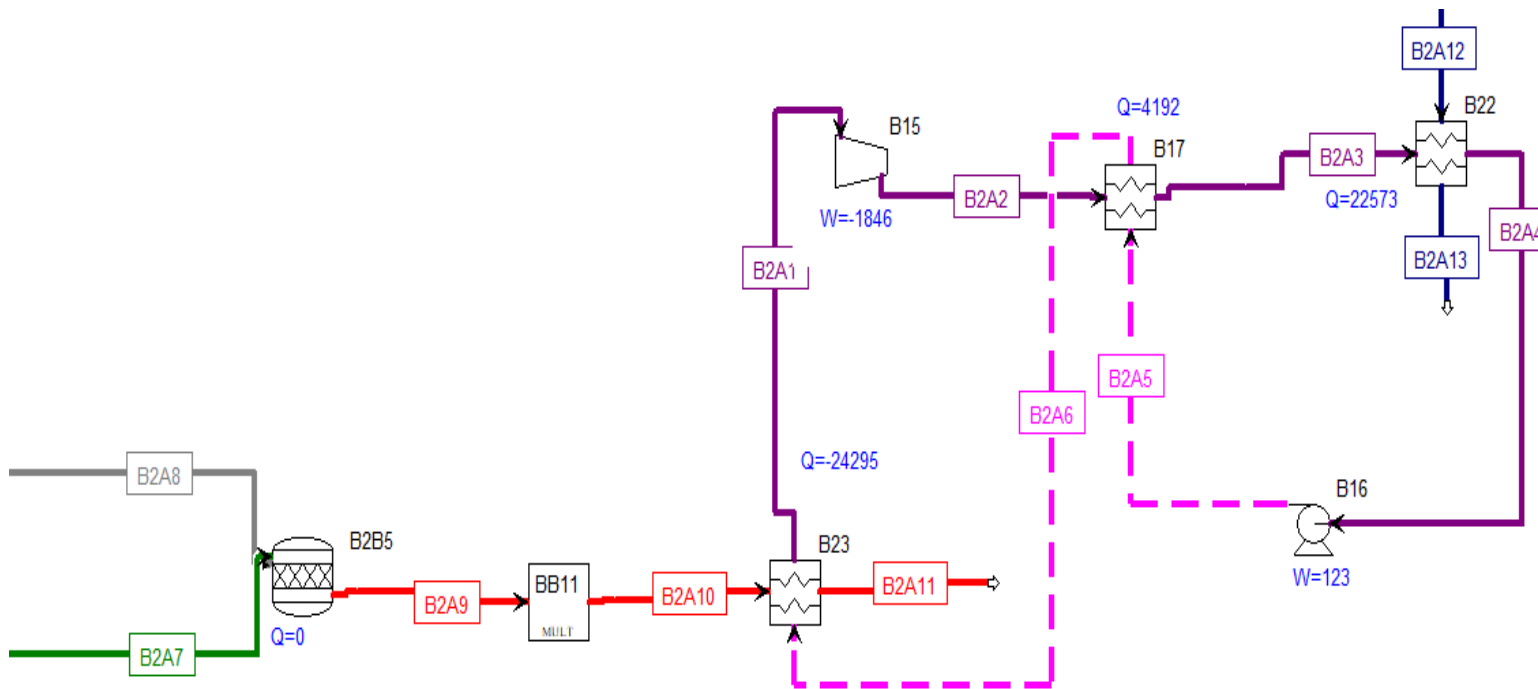


Tabla 1S.

Variables termodinámicas del ciclo del R123 para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

Etapa	Temperatura (K)		Presión (kPa)		Entalpía (kJ/kg)		Entropía (kJ/kg)	
Evaporación y sobrecalentamiento	T6	337,7	P6	1200	h6	-4996,48	s6	-2,089
	T1	398,2	P1	1200	h1	-4808,75	s1	-1,600
Expansión	T1	398,2	P1	1200	h1	-4808,75	s1	-1,600
	T2	360,2	P2	170,4	h2	-4823,01	s2	-1,543
Regenerador	T2	360,2	P2	170,4	h2	-4823,01	s2	-1,543
	T3	316,8	P3	170,4	h3	-4855,40	s3	-1,638
	T5	306,8	P5	1200	h5	-5028,87	s5	-2,190
	T6	337,7	P6	1200	h6	-4996,48	s6	-2,089
Condensador	T3	316,8	P3	170,4	h3	-4855,40	s3	-1,638
	T4	306,2	P4	170,4	h4	-5029,82	s4	-2,191
Bomba	T4	306,2	P4	170,4	h4	-5029,82	s4	-2,191
	T5	306,8	P5	1200	h5	-5028,87	s5	-2,190

Tabla 2S.

Resultados del R123 para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

Corriente	B2A1	B2A2	B2A3	B2A4	B2A5	B2A6	B2A7	B2A8	B2A9	B2A10	B2A11	B2A12	B2A13
T (K)	398,15	360,21	316,765	306,15	306,765	337,683	295,15	295,15	1986,75	1986,75	473,162	295,15	308,163
P (kPa)	1200	170,39	170,39	170,39	1200	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4808,75	-4823,01	-4855,4	-5029,82	-5028,87	-4996,48	-6873,85	-3,2452	-628,234	-628,234	-2627,47	-1,59E+04	-1,58E+04
s (kJ/kg K)	-1,60	-1,54	-1,64	-2,19	-2,19	-2,09	-2,16	0,17	2,41	2,41	0,57	-9,10	-8,92
m (kmol/s)	8,46E-04	8,46E-04	8,46E-04	8,46E-04	8,46E-04	8,46E-04	5,44E+09	4,50E-04	5,05E-04	4,29E-04	4,29E-04	2,30E-02	2,30E-02
M (kg/s)	1,29E-01	1,29E-01	1,29E-01	1,29E-01	1,29E-01	1,29E-01	1,30E-03	1,30E-02	1,43E-02	1,22E-02	1,22E-02	4,15E-01	4,15E-01
V (m³/s)	1,81E-03	1,43E-02	1,23E-02	8,97E+09	8,96E+09	9,51E+09	1,48E-03	1,23E-02	9,28E-02	7,88E-02	1,88E-02	4,16E-04	4,17E-04

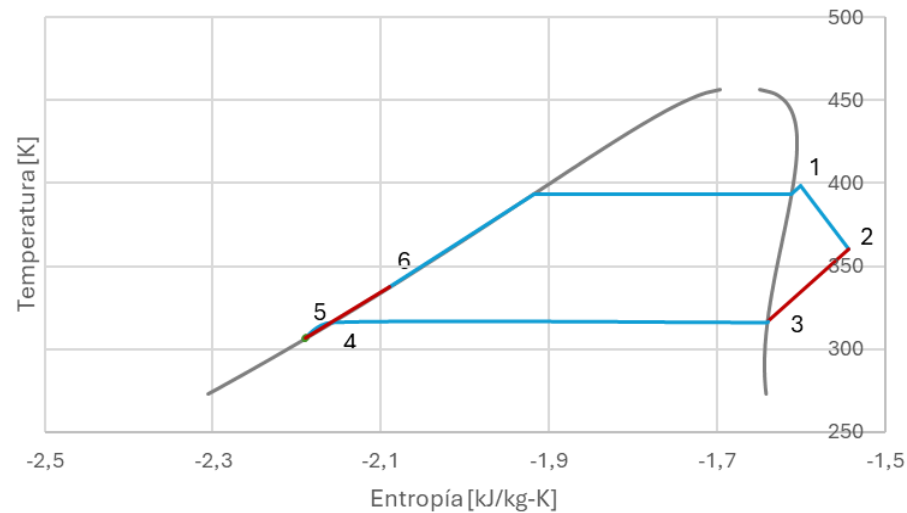
Tabla 3S.

Resultados para el ciclo del R123 para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

Trabajo del expansor (W)	1846
Trabajo de la bomba (W)	123
Calor suministrado (W)	24295
Calor cedido (W)	22573
Calor regenerador (W)	4192
Eficiencia (%)	7,09
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	346,13

Figura 2S.

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del R123 para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador



Apéndice T Complemento objetivo 2 de ciclos con ETANOL empleando regeneración**Figura 1T.**

Ciclo del ciclo del etanol para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

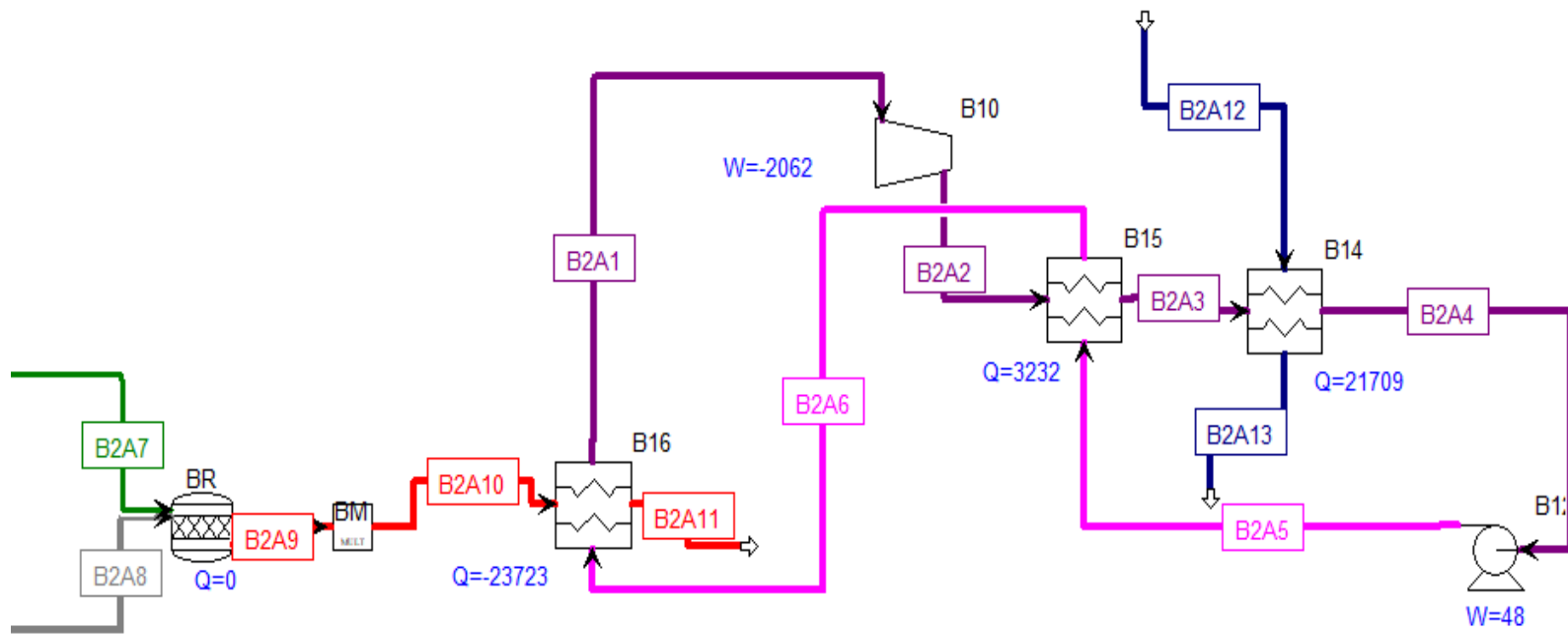


Figura 2T.

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del etanol para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

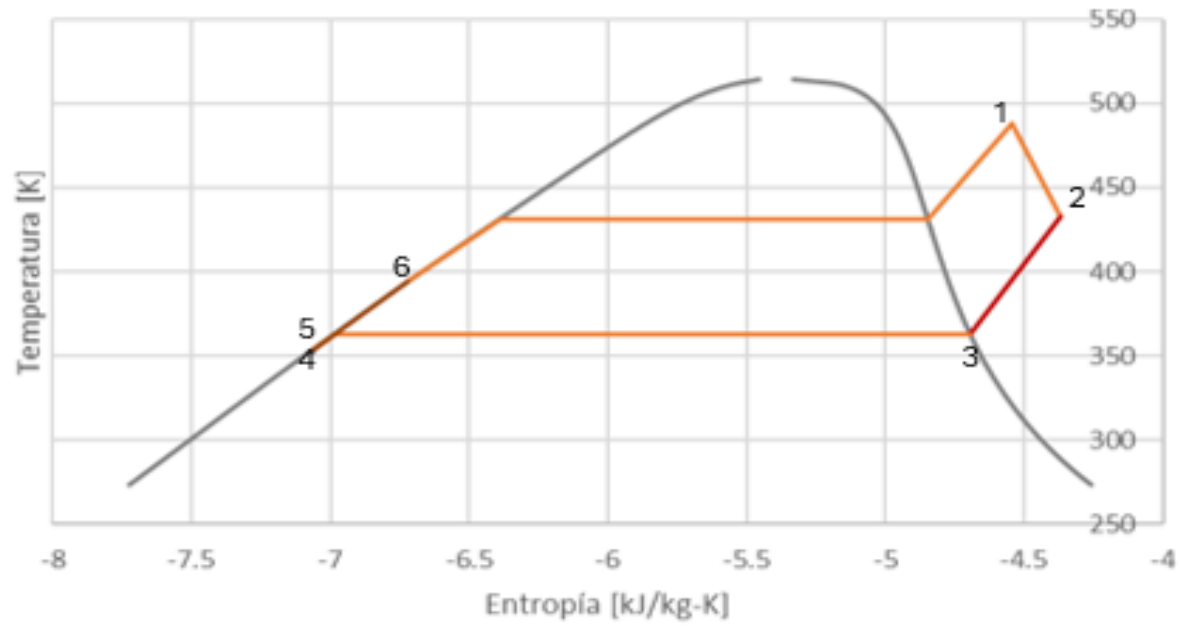


Tabla 1T.

Variables termodinámicas del ciclo del etanol para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

Etapa	Temperatura (K)		Presión (kPa)		Entalpía (kJ/kg)		Entropía (kJ/kg)	
Evaporación y sobrecalentamiento	T6	393,9	P6	1200	h6	-5744,67	s6	-6,720
	T1	488,2	P1	1200	h1	-4804,37	s1	-4,545
Expansión	T1	488,2	P1	1200	h1	-4804,37	s1	-4,545
	T2	432,4	P2	157,3	h2	-4886,10	s2	-4,371
Regenerador	T2	432,4	P2	157,3	h2	-4886,10	s2	-4,371
	T3	363,5	P3	157,3	h3	-5014,22	s3	-4,694
	T5	353,5	P5	1200	h5	-5872,79	s5	-7,063
	T6	393,9	P6	1200	h6	-5744,67	s6	-6,720
Condensador	T3	363,5	P3	157,3	h3	-5014,22	s3	-4,694
	T4	353,2	P4	157,3	h4	-5874,68	s4	-7,064
Bomba	T4	353,2	P4	157,3	h4	-5874,68	s4	-7,064
	T5	353,5	P5	1200	h5	-5872,79	s5	-7,063

Tabla 2T.

Resultados del etanol para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

Corriente	B2A1	B2A2	B2A3	B2A4	B2A5	B2A6	B2A7	B2A8	B2A9	B2A10	B2A11	B2A12	B2A13
T (K)	488,15	432,404	363,541	353,15	353,541	393,859	295,15	295,15	1986,08	1986,08	473,166	295,15	308,155
P (kPa)	1200	157,3	157,3	157,3	1200	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-4804,37	-4886,1	-5014,22	-5874,68	-5872,79	-5744,67	-6873,85	-3,2452	-628,234	-628,234	-2627,39	-1,59E+04	-1,58E+04
s (kJ/kg K)	-4,54	-4,37	-4,69	-7,06	-7,06	-6,72	-2,16	0,17	2,41	2,41	0,57	-9,10	-8,92
m (kmol/s)	5,48E-04	5,48E-04	5,48E-04	5,48E-04	5,48E-04	5,48E-04	5,44E+09	4,50E-04	5,05E-04	4,19E-04	4,19E-04	2,22E-02	2,22E-02
M (kg/s)	2,52E-02	2,52E-02	2,52E-02	2,52E-02	2,52E-02	2,52E-02	1,30E-03	1,30E-02	1,43E-02	1,19E-02	1,19E-02	3,99E-01	3,99E-01
V (m ³ /s)	1,71E-03	1,23E-02	1,01E-02	3,43E+09	3,43E+09	3,65E+09	1,48E-03	1,23E-02	9,28E-02	7,70E-02	1,83E-02	4,00E-04	4,02E-04

Tabla 3T.

Resultados para el ciclo del etanol para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

Trabajo del expansor (W)	2062,0
Trabajo de la bomba (W)	48,0
Calor suministrado (W)	23723,0
Calor cedido (W)	21709,0
Calor regenerador (W)	3232,0
Eficiencia (%)	8,5
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	386,6

Apéndice U Complemento objetivo 2 de ciclos con R245FA empleando regeneración

Figura 1U.

Ciclo del ciclo del R245fa para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

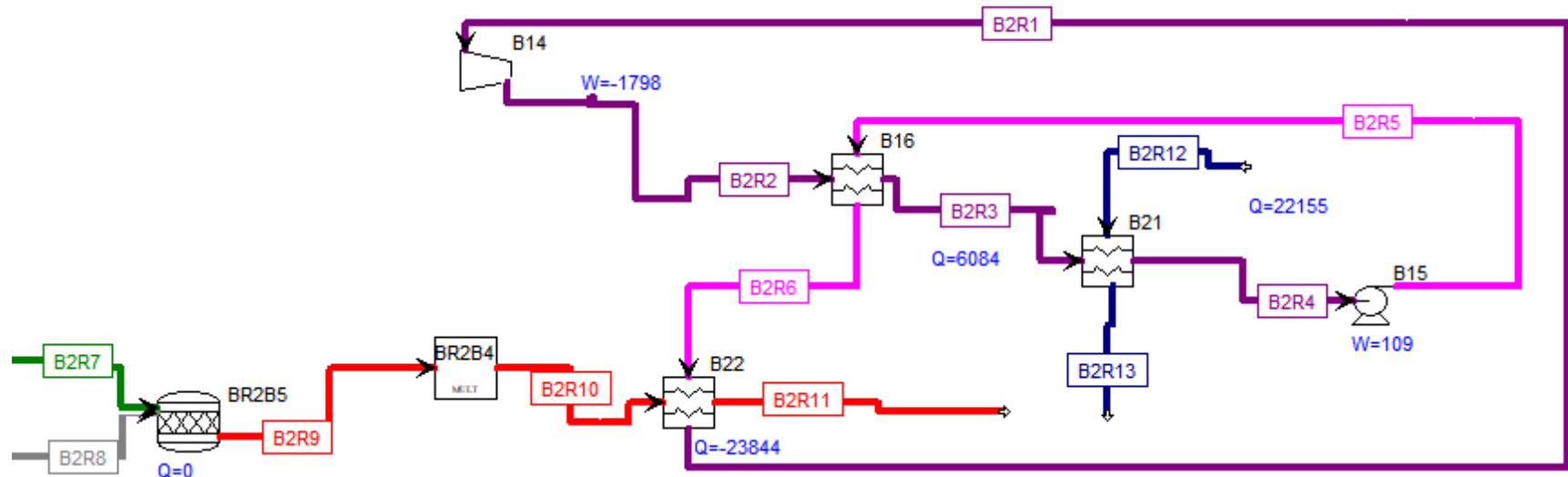


Tabla 1T.

Variables termodinámicas del ciclo del R245fa para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

Etapa	Temperatura (K)		Presión (kPa)		Entalpía (kJ/kg)		Entropía (kJ/kg)	
Evaporación y sobrecalentamiento	T6	330,1	P6	1200	h6	-8910,10	s6	-4,168
	T1	395,2	P1	1200	h1	-8682,72	s1	-3,548
Expansión	T1	395,2	P1	1200	h1	-8682,72	s1	-3,548
	T2	367,6	P2	226,6	h2	-8697,37	s2	-3,492
Regenerador	T2	367,6	P2	226,6	h2	-8697,37	s2	-3,492
	T3	327,6	P3	226,6	h3	-8737,38	s3	-3,608
	T5	300,7	P5	1200	h5	-8950,12	s5	-4,295
	T6	330,1	P6	1200	h6	-8910,10	s6	-4,168
Condensador	T3	327,6	P3	226,6	h3	-8737,38	s3	-3,608
	T4	300,2	P4	226,6	h4	-8951,09	s4	-4,296
Bomba	T4	300,2	P4	226,6	h4	-8951,09	s4	-4,296
	T5	300,7	P5	1200	h5	-8950,12	s5	-4,295

Tabla 2T.

Resultados del R245fa para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerado

Corriente	B2A1	B2A2	B2A3	B2A4	B2A5	B2A6	B2A7	B2A8	B2A9	B2A10	B2A11	B2A12	B2A13
T (K)	395,15	366,208	310,672	300,15	300,673	340,992	295,15	295,15	1986,75	1986,75	473,256	295,15	308,181
P (kPa)	1200	226,612	226,612	226,612	1200	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-8682,72	-8698,76	-8754,17	-8951,09	-8950,12	-8894,71	-6873,85	-3,2452	-628,234	-628,234	-2627,37	-15878,6	-15824,1
s (kJ/kg K)	-3,55	-3,50	-3,66	-4,30	-4,29	-4,12	-2,16	0,17	2,41	2,41	0,57	-9,10	-8,92
m (kmol/s)	8,35E-04	8,35E-04	8,35E-04	8,35E-04	8,35E-04	8,35E-04	5,44E+09	4,50E-04	5,05E-04	4,19E-04	4,19E-04	2,25E-02	2,25E-02
M (kg/s)	1,12E-01	1,12E-01	1,12E-01	1,12E-01	1,12E-01	1,12E-01	1,30E-03	1,30E-02	1,43E-02	1,19E-02	1,19E-02	4,05E-01	4,05E-01
V (m³/s)	1,89E-03	1,08E-02	8,74E-03	8,39E+09	8,38E+09	9,21E+09	1,48E-03	1,23E-02	9,28E-02	7,70E-02	1,83E-02	4,05E-04	4,07E-04

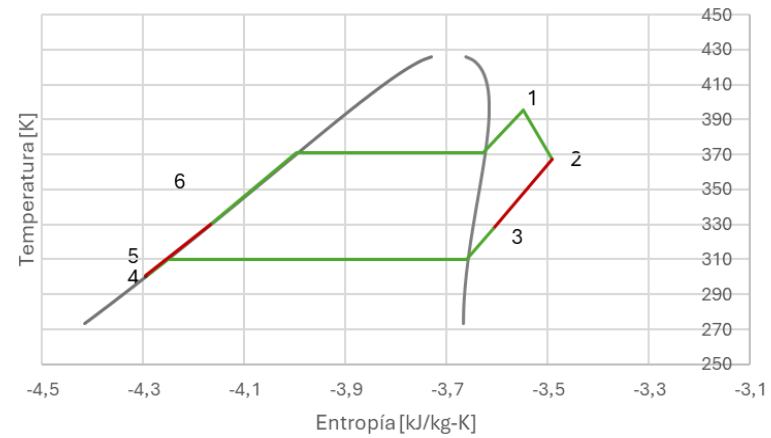
Tabla 3T.

Resultados para el ciclo del R245fa para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

Trabajo del expansor (W)	1795
Trabajo de la bomba (W)	109
Calor suministrado (W)	23723
Calor cedido (W)	22036
Calor regenerador (W)	6200
Eficiencia (%)	7,11
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	336,56

Figura 2U.

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del R245fa para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador



Apéndice V Complemento objetivo 2 de ciclos con AGUA empleando regeneración

Figura 1V.

Ciclo del ciclo del Agua para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

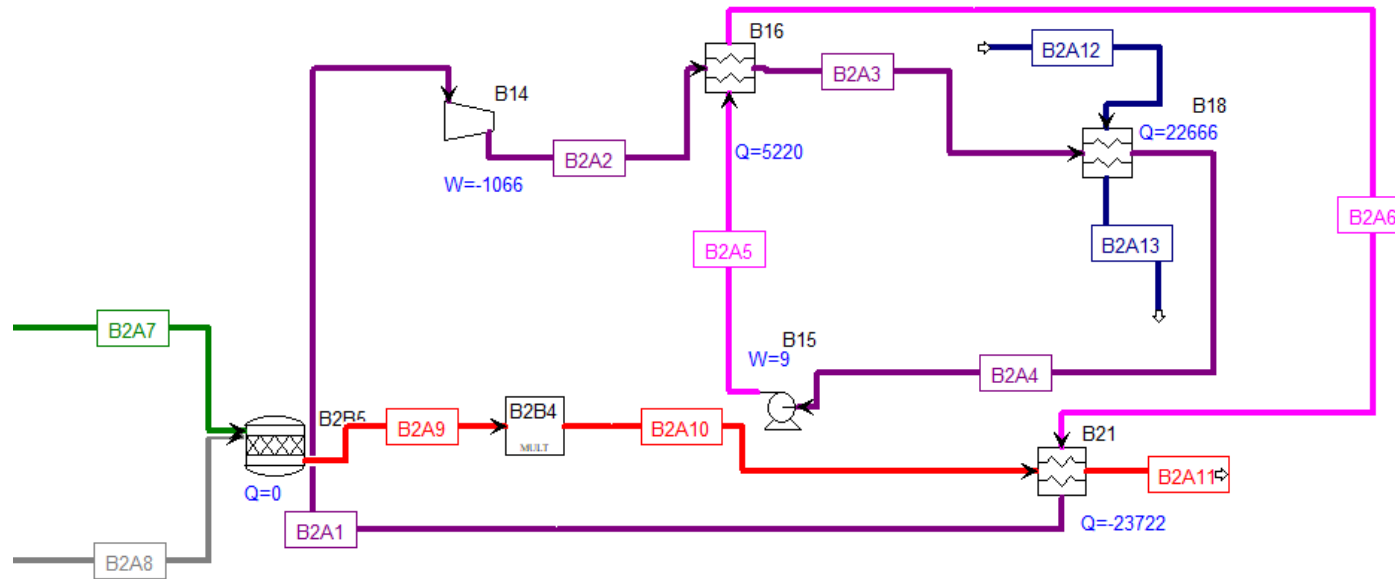


Tabla 1V.

Variables termodinámicas del ciclo del Agua para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

Etapas	Temperatura (K)		Presión (kPa)		Entalpía (kJ/kg)		Entropía (kJ/kg)	
Evaporación y sobrecalentamiento	T6	461,1	P6	1200	h6	-14848,30	s6	-7,21204
	T6'	461,107	P6'	1200	h6'	-15172,6	s6'	-6,509
	T6'	461,107	P6'	1200	h6'	-13187,2	s6'	-2,90629
	T1	713,2	P1	1200	h1	-12623,80	s1	-1,925
Expansión	T1	713,2	P1	1200	h1	-12623,80	s1	-1,925
	T2	662,1	P2	618,2	h2	-12723,70	s2	-1,767
	T2	662,1	P2	618,2	h2	-12723,70	s2	-1,767
Regenerador	T3	433,3	P3	618,2	h3	-13213,20	s3	-2,678
	T5	423,3	P5	1200	h5	-15337,80	s5	-7,586
	T6	461,107	P6	1200	h6	-15172,6	s6	-7,21204
	T3	461,1	P3	1200	h3	-14848,30	s3	-6,509
Condensador	T6'	433,3	P6'	618,2	h6'	-13213,20	s6'	-2,678
	T6'	433,15	P6'	618,2	h6'	-13213,5	s6'	-2,67883
	T4	433,15	P4	618,2	h4	-15295,4	s4	-7,4854
	T4	423,2	P4	618,2	h4	-15338,70	s4	-7,586
Bomba	T5	423,2	P5	618,2	h5	-15338,70	s5	-7,586
	T5	423,3	P5	1200	h5	-15337,80	s5	-7,586

Tabla 2V.

Resultados del Agua para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

Corriente	B2A1	B2A2	B2A3	B2A4	B2A5	B2A6	B2A7	B2A8	B2A9	B2A10	B2A11	B2A12	B2A13
T (K)	713,15	662,075	433,263	423,15	423,263	461,107	295,15	295,15	1986,75	1986,75	473,267	295,15	308,158
P (kPa)	1200	618,235	618,2	618,235	1200	1200	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925	89,925
h (kJ/kg)	-12623,8	-12723,7	-13213,2	-15338,7	-15337,8	-14848,3	-6873,85	-3,2452	-628,234	-628,234	-2627,36	-15878,6	-15824,2
s (kJ/kg K)	-1,92	-1,77	-2,68	-7,59	-7,59	-6,51	-2,16	0,17	2,41	2,41	0,57	-9,10	-8,92
m (kmol/s)	5,92E-04	5,92E-04	5,92E-04	5,92E-04	5,92E-04	5,92E-04	5,44E+09	4,50E-04	5,05E-04	4,19E-04	4,19E-04	2,31E-02	2,31E-02
M (kg/s)	1,07E-02	1,07E-02	1,07E-02	1,07E-02	1,07E-02	1,07E-02	1,30E-03	1,30E-02	1,43E-02	1,19E-02	1,19E-02	4,17E-01	4,17E-01
V (m ³ /s)	2,89E-03	5,23E-03	3,27E-03	1,16E+09	1,16E+09	2,95E-04	1,48E-03	1,23E-02	9,28E-02	7,70E-02	1,83E-02	4,18E-04	4,19E-04

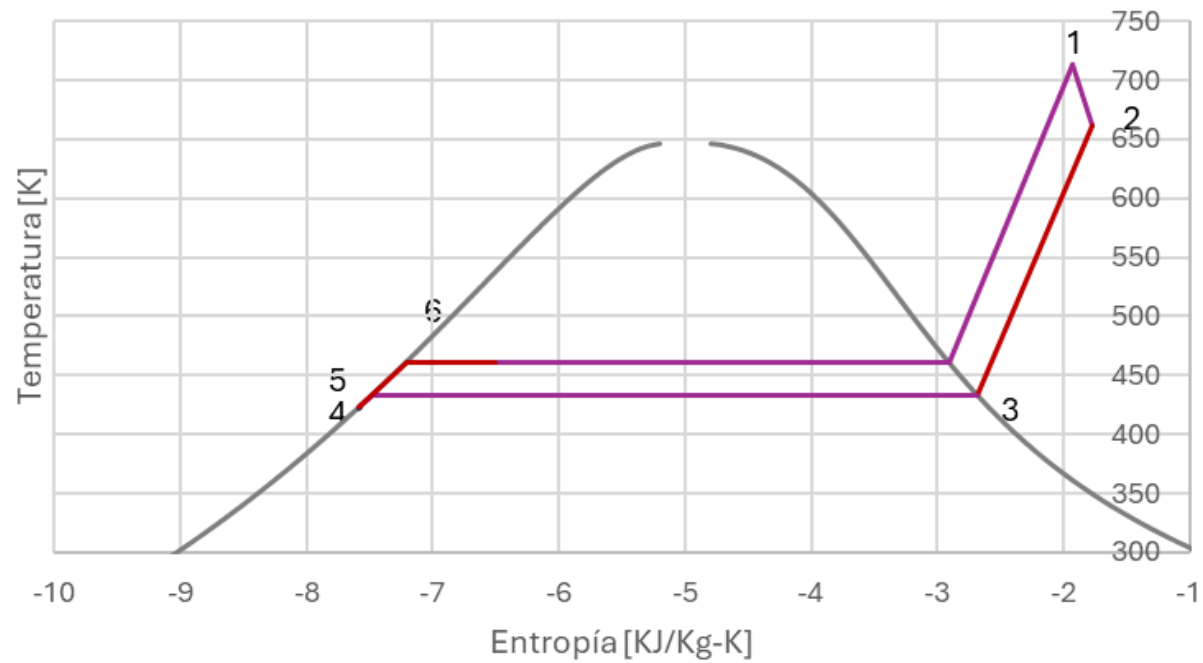
Tabla 3V.

Resultados para el ciclo del Agua para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador

Trabajo del expansor (W)	1066
Trabajo de la bomba (W)	9
Calor suministrado (W)	23722
Calor cedido (W)	22666
Eficiencia (%)	4,46
Rendimiento del ciclo (R) (W/m³)	199,88

Figura 2V.

Diagrama temperatura- entropía para los ciclos del Agua para la granja de Villa Porkinos con las condiciones optimizadas y regenerador



Apéndice W Enlace de la simulación y del Excel.

En este apéndice se proporciona el enlace correspondiente tanto a la simulación como al archivo Excel que contiene los datos y resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto. La simulación modela el sistema estudiado y el Excel detalla los cálculos, parámetros, y análisis complementarios realizados. Ambos recursos están disponibles para consulta y revisión.

<https://1drv.ms/f/c/ea0c397692b4515b/Em0VJszfPwpFrARsAi28TuYBiQpqFQTK88mxTr78yx5jLA?e=3pgVz3>