



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y

AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“ANÁLISIS TECNOECONÓMICO DE GENERACIÓN Y

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON BOMBA DE CALOR Y

CICLO DE RECOMPRESION BRAYTON”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniero en Energías

Renovables

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales renovables

AUTOR:

FRANCO JAVIER CABRERA ORTEGA

DIRECTOR:

Ph.D. PAUL MICHAEL TAFUR ESCANTA

Ibarra-Marzo-2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1751533314		
APELLIDOS Y NOMBRES:	CABRERA ORTEGA FRANCO JAVIER		
DIRECCIÓN:	IBARRA		
EMAIL:	francoortega1221@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:		TELF. MOVIL	0994234340

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS TECNOECONÓMICO DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON BOMBA DE CALOR Y CICLO DE RECOMPRESION BRAYTON
AUTOR (ES):	Franco Javier Cabrera Ortega
FECHA: AAAAMMDD	2026/03/25
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
PROGRAMA	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES
DIRECTOR:	PAÚL MICHAEL TAFUR ESCANTA

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Franco Javier Cabrera Ortega, con cédula de identidad Nro. 1751533314, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o Trabajo de Integración Curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 25 días del mes de Marzo de 2026

EL AUTOR:

Firma.....

Nombre: Franco Javier Cabrera Ortega.

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y son titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 25 días del mes de Marzo de 2026

EL AUTOR:

Firma.....

Nombre: Franco Javier Cabrera Ortega

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 25 de Marzo de 2026

Ing. Paúl Michael Tafur PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)

Ing. Paúl Michael Tafur PhD.

C.C.: 1003867353

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del Trabajo de Integración Curricular “ANÁLISIS TECNOECONÓMICO DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON BOMBA DE CALOR Y CICLO DE RECOMPRESIÓN BRAYTON” elaborado por Cabrera Ortega Franco Javier, previo a la obtención del título de Ingeniero en Energías Renovables, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f):.....

TUTOR: Ing. Paúl Michael Tafur PhD.

C.C.: 1003867353

(f):.....

ASESOR: Ing. Robert Valencia PhD.

C.C.: 1003134879

(f):.....

BIOMETRISTA: Ing. Juan Carlos García PhD.

C.C.: 1002279535

DEDICATORIA

A **DIOS**, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. A Él agradezco las oportunidades, la esperanza renovada y las fuerzas que me permiten alcanzar mis metas.

A mi amada y valiente mamá **ANA LUISA ORTEGA MERA** esta tesis es el resultado de tu amor, apoyo y sacrificio en mi viaje educativo. Cada día que trabajaste incansablemente y aun así me brindaste todo tu cariño, cuidado y amor. Esta tesis que es un tributo a ti que eres mi fuente inagotable de fortaleza y amor la mujer que me ha guiado por el camino correcto y no me ha soltado de la mano el faro que ilumina mi camino TE AMO MAMITA.

Para mi hermana **ALANIS EMILIA CABRERA ORTEGA** por enseñarme que la vida es divertida cuando hay compañía. Me has demostrado que la travesía de tener una hermana menor es una aventura maravillosa y divertida desde la escuela hasta la universidad Te quiero mucho.

Para mi abuela **ANA LUCIA MERA VELASCO**, por ser el pilar fundamental de mi familia y fuente inagotable de amor. Por los valores que me definen como profesional también como persona. Por ser mi compañera de viaje cada viaje me enseñó que lo importante no es el destino sino con quien lo comparte.

Para mis tías y tío **MARIA LORENA ORTEGA MERA, AURA MILENA ORTEGA MERA, AGUSTA GABRIELA ORTEGA MERA, JORGE BOLIVAR ORTEGA MERA** por sus palabras de aliento, haber estado presentes en cada etapa y decisión mas importantes de mi vida dándome siempre el apoyo moral, consejos que han sido un pilar fundamental para alcanzar esta meta.

Para mis primos mayores ***JORGE DAVID ORTEGA VÁSQUEZ Y ANA CRISTINA ORTEGA VÁSQUEZ*** por ser la fuente de inspiración, ver sus logros me inspiro a no rendirme y a esforzarme para estar a su altura.

Para mis primos menores ***JOSE DANIEL SARDINHA ORTEGA, MARTIN SEBASTIAN ORTEGA VÁSQUEZ, MARIA ALEJANDRA ZELAYA ORTEGA Y MARIA CELESTE ZELAYA ORTEGA*** por recordarme la importancia de la curiosidad y la alegría. Que este logro les recuerde que todo esfuerzo tiene su recompensa.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser mi guía espiritual y mi fortaleza. Gracias por bendecirme con la vida, la salud y la sabiduría necesaria para culminar este objetivo; a Él le debo la perseverancia para no decaer y la dicha de ver cumplido este sueño.

A la Universidad Técnica del Norte, mi Alma Mater, por haberme abierto sus puertas y ser el escenario de mi formación profesional. Agradezco a esta noble institución por brindarme las herramientas y el ambiente académico necesario para crecer intelectualmente.

A la Carrera de Energías Renovables y a todo su cuerpo docente, por la excelencia académica brindada. Gracias por inculcarme una visión innovadora y responsable sobre el desarrollo energético, y por darme las competencias para aportar a la sociedad

Un agradecimiento especial y sentido al PhD. Paúl Tafur. Su guía fue un faro constante en este proceso; gracias por compartir generosamente su vasto conocimiento y por dedicar horas invaluable a la revisión y mejora de esta investigación. Su apoyo fue mucho más allá de lo académico; gracias por creer en mi potencial y por brindarme las herramientas para convertirme en un mejor profesional. Este logro lleva su sello de excelencia.

Al PhD. Robert Valencia, mi asesor, por su inestimable colaboración y sabiduría. Gracias por su visión crítica y acertada que permitió elevar sustancialmente la calidad de esta investigación. Agradezco profundamente su disposición siempre amable para resolver mis inquietudes y por orientarme con precisión en los momentos más complejos. Su experiencia y sus consejos fueron un pilar fundamental para culminar con éxito este reto.

RESUMEN

El propósito de este estudio es evaluar la viabilidad tecnoeconómica de un sistema de almacenamiento térmico por bombeo (PTES) basado en el ciclo Brayton de recompresión de dióxido de carbono en estado supercrítico (s-CO₂). Para ello, se implementó un análisis multiparamétrico utilizando el algoritmo NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), con variables críticas que incluían las fracciones másicas dirigidas al compresor, las fracciones másicas dirigidas a la turbina de alta presión. El análisis efectuado también contempló las condiciones de presión y temperatura de entrada del compresor, así como la temperatura de entrada de la turbina. La optimización de los parámetros de rendimiento, incluida la eficiencia round-trip (η_{rt}) y el coste nivelado de almacenamiento (LCOS), facilitó la identificación de las compensaciones inherentes entre el rendimiento termodinámico y el económico. Los resultados obtenidos en este estudio indican que, al minimizar el LCOS, el sistema alcanza un valor de 148,72 \$/MWh con un η_{rt} del 57,1 %, mientras que al maximizar la eficiencia se alcanza el 61,5 % con un LCOS superior de 158,4 \$/MWh. El análisis de destrucción de exergía subraya la importancia estratégica del compresor principal y los tanques de almacenamiento en la distribución de irreversibilidades. Los hallazgos reportados en este estudio corroboran la factibilidad técnica del ciclo de recompresión Brayton s-CO₂ como alternativa competitiva para el almacenamiento térmico de larga duración.

Palabras clave: LCOS, NSGA-II, PTES, Eficiencia round-trip, s-CO₂, RCB.

ABSTRACT

The present study concentrates on the thermo-economic evaluation of a pumped thermal storage system (PTES) based on a supercritical carbon dioxide (s-CO₂) recompression Brayton cycle. A multiparameter analysis was conducted using the second-generation multi-objective optimization algorithm (NSGA-II), with critical variables including the mass fractions directed to the recompressor in the charging stages and the mass fractions directed to the high-pressure turbine in the discharging stage. The analysis also considered the compressor inlet pressure and temperature conditions and the turbine inlet temperature. The optimization of performance parameters, including round-trip efficiency (η_{RT}) and levelized cost of storage (LCOS), facilitated the identification of the inherent trade-offs between thermodynamic and economic performance. The findings indicate that by minimizing the LCOS, the system attains a value of 148.72 \$/MWh with an η_{RT} of 57.1%, while by maximizing the efficiency, it is attained at 61.5% with a higher LCOS of 158.4 \$/MWh. The exergy destruction analysis underscores the strategic importance of the main compressor and storage tanks in the distribution of irreversibilities. These findings confirm the technical feasibility of the s-CO₂ Brayton recompression cycle as a competitive solution for long-duration thermal storage.

Keywords: LCOS, NSGA-II, PTES, Round-trip Efficiency, s-CO₂, RBC

LISTA DE SIGLAS

CAPEX	Capital expenditure, M\$
CIP	Compressor inlet pressure, MPa
CIT	Compressor inlet temperature, K
CSP	Concentrating solar power
COP	Coefficient of performance
COP_{Eq-Carnot}	Equivalent Carnot coefficient of performance
HP	Heat pump
LCOS	Levelized cost of storage, \$/MWh
LSTM	Long short-term memory
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
OPEX	Operational expenditure, M\$
PTES	Pumped thermal energy storage
REFPROP	Reference fluid properties
RBC	Recompression Brayton cycle
s-CO₂	Supercritical carbon dioxide
SP	Scaling parameter
TIT	Turbine inlet temperature, K
chg	Charge
dis	Discharge
mix	Mixture
ms	Molten salts
w	Water
γ	Split ratio
η_c	Compressor efficiency
$\eta_{Eq-Carnot}$	Equivalent Carnot efficiency
η_{ex}	Exergetic efficiency
η_g	Generator efficiency
η_{rt}	Round-trip efficiency
η_t	Turbine efficiency
η_{th}	Thermal efficiency
$\dot{\sigma}$	Entropic generation, W/K
<i>C</i>	Cost, USD
<i>e</i>	Specific exergy, J/kg
$\dot{E}_D$	Exergy destruction rate, kW
f_T	Temperature correction factor
<i>H</i>	Hours of operation of the plant, h
<i>h</i>	Specific enthalpy, J/kg
$\dot{m}$	Mass flow rate, kg/s
<i>N</i>	Lifetime of technology, years
<i>n</i>	Specific year of operation
<i>P</i>	Pressure, MPa
$\dot{Q}$	Heat, W
<i>r</i>	Discount rate
r_p	Compression ratio
<i>s</i>	Specific entropy, J/kg·K
<i>T</i>	Temperature, K
<i>V</i>	Volume, m ³

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
LISTA DE SIGLAS	12
Índice de figuras.....	16
Índice de tablas.....	18
INTRODUCCIÓN	19
1.1 Problema de Investigación.....	19
1.2 Justificación.....	21
1.3 Objetivos	22
<i>1.3.1 Objetivo General</i>	<i>22</i>
<i>1.3.2 Objetivos Específicos.....</i>	<i>22</i>
1.4 Pregunta de investigación.....	22
1.5 Hipótesis.....	22
CAPÍTULO I.....	24
MARCO TEÓRICO.....	24
2.1 Ciclos de potencia Brayton.....	27
2.2 Dióxido de Carbono como fluido de trabajo	28
2.3 Funcionamiento de bombas de calor	31
2.4 Baterías de Carnot	32
2.5 Sistema de almacenamiento térmico por bombeo	33

	14
2.6 Algoritmo NSGA	34
CAPÍTULO II	35
MATERIALES Y MÉTODOS	35
3.1 Área de estudio	35
3.2 Métodos	36
3.2.1 Descripción de sistema	36
3.3 Validación del Modelo	44
CAPÍTULO III	45
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
3.1 Análisis de sensibilidad de la temperatura de entrada al compresor	45
3.1.1 Mínimo Costo nivelado de almacenamiento LCOS	45
3.1.2 Máxima eficiencia Round-trip	46
3.2 Análisis de sensibilidad de la temperatura de entrada a la turbina	48
3.2.1 Mínimo Costo Nivelado de Almacenamiento (LCOS)	48
3.2.2 Máxima eficiencia Round-trip	49
3.3 Análisis de sensibilidad de la presión de entrada al Compresor	50
3.3.1 Mínimo Costo Nivelado de Almacenamiento (LCOS)	50
3.3.2 Máxima eficiencia Round-trip	51
3.4 Análisis sensible de la fracción másica de carga	53
3.4.1 Mínimo Costo nivelado de almacenamiento (LCOS)	53
3.4.2 Máxima eficiencia Round-trip	54

3.5 Análisis sensible de la fracción de masica de descarga.....	55
3.5.1 <i>Mínimo Costo Nivelado de Almacenamiento (LCOS)</i>	55
3.5.2 <i>Máxima eficiencia Round-trip</i>	56
3.6 Análisis de sensibilidad tridimensional	58
3.6.1 <i>Mínimo Costo Nivelado de Almacenamiento (LCOS)</i>	58
3.6.2 <i>Máxima Eficiencia Round-trip</i>	58
3.7 Comparación de eficiencia Exergética	59
3.8. Análisis comparativo de destrucción de exergía	61
3.9 Comparación de rendimiento del sistema PTES	64
CAPÍTULO IV	66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	66
4.1 Conclusiones	66
5.2 Recomendaciones	68
REFERENCIAS.....	69

Índice de figuras

Figura 1 Ciclos de potencia Brayton.....	27
Figura 2 Propiedades del CO ₂	30
Figura 3 <i>Funcionamiento de una bomba de calor.</i>	31
Figura 4 Esquema de funcionamiento de una batería térmica de Carnot durante las etapas de carga y descarga	32
Figura 5 Sistema de carga (a) Sistema de descarga (b).....	34
Figura 6 Mapa de ubicación.....	35
Figura 7 <i>Recompression Brayton cycle as PTES system. (a) etapa de carga, (b) etapa descarga.</i>	36
Figura 8 <i>Diagrama de flujo del código para el desarrollo de la investigación utilizando MATLAB y Python</i>	38
Figura 9 Impacto en la temperatura de entrada al compresor. (a) Round-trip efficiency vs. CIT and (b) LCOS vs. CIT.....	46
Figura 10 Impacto en la temperatura de entrada al compresor. (a) Round-trip efficiency vs. CIT and (b) LCOS vs. CIT.....	47
Figura 11 Impacto en la temperatura de entrada a la turbina. (a) Round-trip efficiency vs. TIT and (b) LCOS vs. TIT	48
Figura 12 Impacto en la temperatura de entrada a la turbina. (a) Round-trip efficiency vs. TIT and (b) LCOS vs. TIT.	50
Figura 13 Impacto en la presión de entrada al compresor. (a) Round-trip efficiency vs. CIP and (b) LCOS vs. CIP	51
Figura 14 Impacto en la presión de entrada al compresor. (a) Round-trip efficiency vs. CIP and (b) LCOS vs. CIP	52

Figura 15 Impacto en la fracción másica de carga. (a) Round-trip efficiency vs. γ_{ch} , and (b) LCOS vs. γ_{ch} ,	53
Figura 16 Impacto en la fracción másica de carga. (a) Round-trip efficiency vs. γ_{ch} , and (b) LCOS vs. γ_{ch} ,	55
Figura 17 Impacto en la fracción másica de descarga. (a) Round-trip efficiency vs. γ_{dis} , and (b) LCOS vs. γ_{dis}	56
Figura 18 Impacto en la fracción másica de descarga. (a) Round-trip efficiency vs. γ_{dis} , and (b) LCOS vs. γ_{dis}	57
Figura 19 Impacto de la proporción de carga y descarga en el LCOS.....	58
Figura 20 <i>Impacto de la proporción de carga y descarga en la eficiencia round-trip.</i>	59
Figura 21 Eficiencia exergética. (a) Eficiencia exergética en el mínimo LCOS y en la fase de carga, (b) Eficiencia exergética en el mínimo LCOS y en la fase de descarga, (c) Eficiencia exergética en el máximo de eficiencia Round-trip y en la fase de carga, (d) Eficiencia exergética en el máximo de eficiencia Round-Trip y en la fase de descarga.	61
Figura 22 Destrucción de exergía. (a) Destrucción de exergía en el mínimo LCOS y en la etapa de carga, (b), Destrucción de exergía en el mínimo LCOS y en la etapa de descarga, (c) Destrucción de exergía en la máxima Round-trip y en la etapa de carga (d) Destrucción de exergía en la máxima eficiencia Round-trip y en la etapa de descarga.	63
Figura 23 Comparación de los indicadores de rendimiento termodinámico y exergético del sistema Recompresión Ciclo Brayton RBC-PTES.....	64

Índice de tablas

Tabla 1	Suposiciones de entrada clave para el análisis.....	39
Tabla 2	Resultados de la validación del modelo	44
Tabla 3	Comparación con el resto de los resultados	65
Tabla 4	Propiedades de los resultados finales.....	67

INTRODUCCIÓN

En esta sección se detallan la problemática, la justificación de la investigación y sus objetivos. Así mismo, se presentan las preguntas de investigación e hipótesis que constituyen el eje central de la investigación.

1.1 Problema de Investigación

El uso extensivo de combustibles fósiles ha generado una creciente preocupación por las emisiones de CO₂ y sus efectos en el cambio climático, lo cual ha impulsado el desarrollo de tecnologías energéticas más limpias, este proceso implica la sustitución sistemática de fuentes convencionales de alta intensidad de carbono principalmente carbón, petróleo y gas natural por tecnologías basadas en energías renovables como energía solar fotovoltaica y eólica cuya penetración en el mix energético mundial ha ido en aumento (Hao & Khan, 2025).

Estados Unidos, a través de Departamento de Energía (DOE), ha trazado una hoja de ruta estratégica para la implementación del ciclo Brayton con CO₂ en estado supercrítico, reconociéndolo como una tecnología clave para el futuro de la generación de energía eléctrica. Esta decisión responde a la creciente necesidad de contar con sistemas energéticos más eficientes, compactos sostenibles, frente a las limitaciones de los ciclos térmicos tradicionales (U.S Department of Energy, 2016). El dióxido de carbono (CO₂) se emplea como fluido de trabajo en los ciclos Brayton supercríticos debido a su bajo coste, disponibilidad y favorables propiedades termodinámicas, no obstante, en áreas con temperaturas elevadas, la condensación del dióxido de carbono puede no ocurrir de manera óptima, lo que afecta el desempeño del ciclo. Por ello se han desarrollado mezclas con el (CO₂) con diferentes compuestos para modificar su punto crítico (Valencia Robert, 2022).

En el trabajo de Tafur, (2024) se analiza en profundidad el comportamiento termoenergético con diferentes fluidos de trabajo y topologías de ciclos Brayton, especialmente

en el contexto de su integración con plantas solares de concentración. Este enfoque es particularmente relevante para el desarrollo de nuevas condiciones de trabajo en ciclos Brayton. En el estudio se propone modelar el comportamiento del ciclo de Recompresión (RBC), Recompresión con Enfriamiento Intermedio en el Compresor Principal (RCMCI) y Enfriamiento Parcial con Recompresión (PCRC) teniendo en cuenta la variación de la temperatura de entrada al compresor (CIT), temperatura de entrada a la turbina (TIT) y tamaño térmico (UA), además de las irreversibilidades generadas en los componentes.

Los diferentes sistemas de generación de energía eléctrica a través de energía térmica de concentración han impulsado la necesidad de sistemas de almacenamiento eficientes. Las baterías de Carnot, basadas en ciclos termodinámicos, han surgido como una solución destacada. En especial, los sistemas de almacenamiento térmico por bombeo (PTES) que utilizan ciclos termodinámicos utilizando CO₂ en estado supercrítico como fluido de trabajo, ofrecen alta eficiencia, bajo coste y buena escalabilidad, convirtiéndose en un referente de estudio actual (Paul Tafur et al., 2022) .

En estos sistemas PTES el uso del ciclo Brayton con CO₂ supercrítico aporta ventajas significativas: mayor eficiencia térmica, operación a altas presiones y temperaturas, reducción de pérdidas y tamaño de equipos. Estas características lo hacen atractivo para el almacenamiento térmico a gran escala. No obstante, es imprescindible analizar otras topologías y en ellas las variables como la relación de compresión, flujo másico, temperaturas de entrada al compresor y presión a la entrada de la turbina, ya que son determinantes para evaluar el costo nivelado de almacenamiento (LCOS) y la evolución de la eficiencia *round-trip* (Paul Tafur et al., 2022)

1.2 Justificación

En el desarrollo de estas tecnologías energéticas más eficientes es fundamental la implementación de ciclos Brayton en la generación de energía contribuye significativamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7 y 13. El ODS número 7 busca garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, y el ciclo Brayton, al mejorar la eficiencia en la producción energética responde directamente a este objetivo. Asimismo, el ODS 13, que promueve la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, se ve favorecido mediante la utilización de tecnologías limpias ocupando el CO₂ en estado supercrítico reduciendo los gases de efecto invernadero. El impulso de este tipo de innovación tecnológica constituye a una acción concreta hacia la transformación sostenible.

En la Constitución de la República del Ecuador establece en su artículo 15 que el Estado promoverá el desarrollo y el uso de tecnologías ambientales limpias y energías alternativas no contaminantes. Este mandato constitucional se erige como un pilar normativo que fundamenta el impulso de iniciativas energéticas que pueden ser desarrolladas de manera sostenible mediante la implementación de los ciclos Brayton adaptándolos a fuentes de energía renovable. De esta manera, se asegura el derecho colectivo a habitar en un entorno sano y ecológicamente equilibrado garantizando así la calidad de vida de los individuos y el bienestar de la población.

En afinidad con la Constitución del Ecuador del 2008, el Código Orgánico del Ambiente establece disposiciones normativas a regular, las actividades de generación de energía, con el propósito de garantizar su sostenibilidad y respeto a la naturaleza. Esta ley exige la realización de evaluaciones de impacto ambiental y fomenta el uso de tecnologías limpias, como aquellas basadas en el ciclo Brayton, siempre contribuyan a la sostenibilidad y la eficiencia en el uso de los recursos naturales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar técnica y económicamente la generación y almacenamiento de energía con bomba de calor y ciclo de recompresión Brayton.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Simular diferentes parámetros del sistema de almacenamiento térmico con el fin de optimizar el LCOS (Levelized Cost of Storage) y la eficiencia round-trip.
- Parametrizar la temperatura de entrada al compresor en función de LCOS y eficiencia round trip
- Parametrizar la temperatura de entrada a la turbina en función de LCOS y eficiencia round trip
- Parametrizar la presión de entrada al compresor principal en función de LCOS y eficiencia round trip.
- Parametrizar la fracción másica que se dirige al recompresor (γ) en función de LCOS y eficiencia round trip.

1.4 Pregunta de investigación

¿Cómo la eficiencia round-trip y el LCOS pueden optimizarse mediante un ajuste simultáneo de temperatura, presión y γ existiendo un punto óptimo de operación para cada combinación tecnológica?

1.5 Hipótesis

H1. Influye significativamente en la eficiencia térmica del ciclo, y su ajuste adecuado para mejorar el rendimiento global del sistema en base a las variables de la fracción γ , temperatura y presión.

H0. No influye significativamente en la eficiencia térmica del ciclo, y su ajuste adecuado para mejorar el rendimiento global del sistema en base a las variables de la fracción gamma, temperatura y presión.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

El acelerado efecto del cambio climático vinculado al uso prolongado de los combustibles fósiles ha impulsado una transformación progresiva de los sistemas energéticos en todo el mundo. Esta transición se centra en fuentes de energía más limpias y sostenibles, como la solar concentrada, la fotovoltaica y la eólica, como respuesta a la urgente necesidad de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. La implementación de estas tecnologías en la combinación energética mundial ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años (Hao & Khan, 2025).

La variabilidad inherente a estos recursos renovables es uno de los principales inconvenientes para su integración en los sistemas eléctricos mundiales. Su intermitencia dificulta el equilibrio entre la generación y la demanda, lo que pone en riesgo la estabilidad de la red eléctrica (Quinteros Campaña & Tafur Escanta, 2023). En el contexto actual, se plantea la necesidad imperativa de implementar sistemas de almacenamiento de energía que sean capaces de gestionar de manera eficiente los excedentes energéticos y de este modo asegurar un suministro continuo y confiable (Rekioua, 2023). No obstante, varias tecnologías de almacenamiento tales como los sistemas de baterías electroquímicas, exhiben restricciones en términos de la escalabilidad, costo y vida útil (Sharma et al., 2023).

En la actualidad los sistemas de almacenamiento de energía (ESS) se clasifican en cinco grandes categorías, en función de la forma que almacenan energía. Los sistemas eléctricos (EESS) incorporan diversas tecnologías en las que incluyen capacitores, super capacitores y almacenamiento magnético mediante superconductores (SMES). Los sistemas electroquímicos (ECESS) engloban una amplia gama de baterías, que incluyen las de plomo-acido, ion de litio, níquel-cadmio, sodio-azufre y baterías de flujo (González-Roubaud et al., 2017). Los sistemas

mecánicos (MESS) hacen uso de tecnologías tales como volantes de inercia, almacenamiento hidroeléctrico por bombeo (PHES) y el almacenamiento de aire comprimido (CAESA). Por su parte, los sistemas térmicos (TESS) almacenan calor sensible, calor latente o energía termoquímica. Finalmente, los sistemas químicos (CESS) emplean pilas de combustible, almacenamiento de hidrógeno, amoníaco, biocombustibles y aluminio para conservar la energía de forma eficiente (Elalfy et al., 2024).

El desarrollo de tecnologías energéticas más eficientes y sostenibles ha impulsado una fuerte investigación en torno al ciclo Brayton, especialmente en aplicaciones de generación solar y nuclear (J. McTigue & Ma, 2025). En el ámbito de la actual tecnología, el empleo del dióxido de carbono (CO_2) en su estado supercrítico como fluido de trabajo se ha erigido como una alternativa sumamente prometedora. Este fenómeno se explica por su notable capacidad para alcanzar eficiencias térmicas elevadas y facilitar la construcción de equipos de compactos y ligeros con bajo impacto ambiental (Crespi et al., 2017).

Con el propósito de optimizar la eficiencia térmica, el ciclo Brayton convencional ha experimentado una evolución hacia configuraciones contemporáneas. Se han desarrollado diversos sistemas para optimizar procesos de generación y almacenamiento de energía. Entre estos sistemas, destacan el sistema simple y sus variantes en contexto de la descarbonización de la matriz energética y cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Trevisan et al., 2020).

Investigaciones recientes, han demostrado que el empleo de CO_2 supercrítico ocupando ciclos Brayton puede aumentar la eficiencia del sistema hasta valores superiores al 50%, en comparación con tecnologías convencionales basadas en vapor de agua. Enfatiza la necesidad de una optimización termo-hidráulica precisa y de estrategias avanzadas de integración térmica para aprovechar plenamente el potencial de estos ciclos (Tafur-Escanta et al., 2022a).

Asimismo, estudios de (Valencia-Chapi et al., 2022) han analizado el comportamiento dinámico de los ciclos Brayton supercríticos bajo condiciones variables típicas de plantas solares, identificando retos como las inestabilidades térmicas, los gradientes de presión y los efectos de estratificación del fluido en estado supercrítico. En sus investigaciones, se evidencia la relevancia de ejercer un control meticuloso sobre las condiciones operativas con el propósito de evitar mermas en el rendimiento en contextos reales.

El Almacenamiento térmico mediante sales fundidas ha demostrado ser una tecnología altamente eficiente y madura, especialmente en aplicaciones de energía solar. Como se han demostrado en diversos estudios, el diseño y la optimización de estos sistemas se han abordado diferentes perspectivas, se ha destacado su capacidad para operar a altas temperaturas. En segundo lugar, se ha evidenciado su viabilidad para almacenamiento estacional.

Investigaciones recientes han analizado tanto sistemas de doble tanque como configuraciones innovadoras como las estructuras de termoclina y barreras flotantes que permiten reducir costos y mejorar la eficiencia del almacenamiento térmico (Prieto et al., 2024).

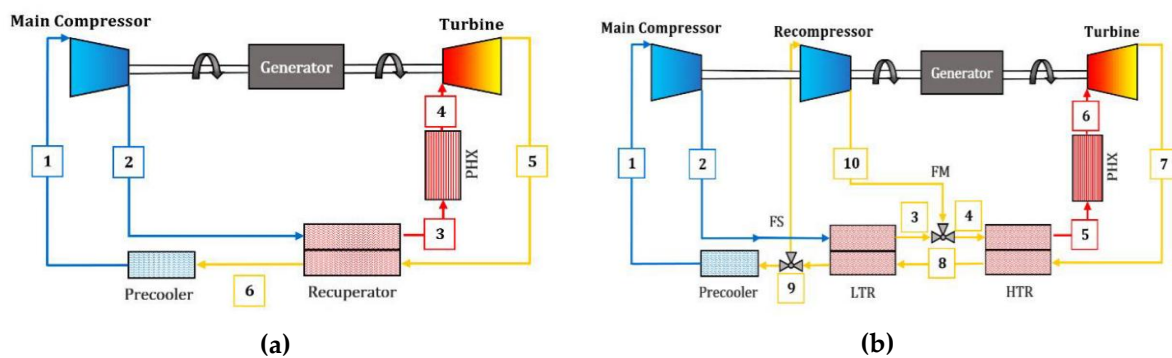
En este contexto los sistemas de bombeo son fundamentales en procesos industriales donde se requiere trasladar fluidos entre diferentes componentes del sistema. Su eficiencia incide directamente en el rendimiento energético global, por lo que su diseño y operación deben optimizarse para reducir el consumo parasitario y mejorar la sostenibilidad del proceso (J. McTigue & Ma, 2025).

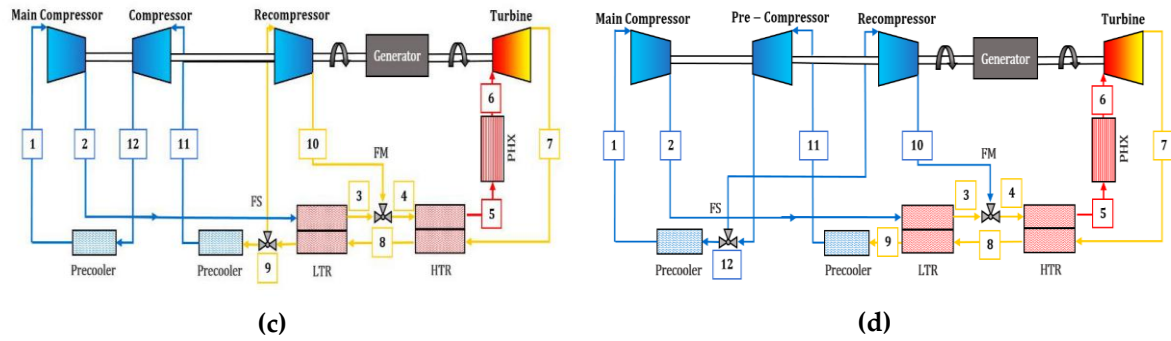
2.1 Ciclos de potencia Brayton

Según las investigaciones (Tafur Paúl, 2024) El ciclo Brayton simple cerrado (Simple Cycle) es un sistema de ciclos termodinámicos que opera con un compresor, un calentador, una turbina y un enfriador. Este ciclo transforma la energía térmica en energía mecánica mediante la utilización de un fluido de trabajo, como el dióxido de carbono (CO_2) supercrítico. Sin embargo, este ciclo presenta limitaciones, como la ausencia de recuperación de calor y una alta sensibilidad a las variaciones en la temperatura del foco frío como se muestra en la figura 1 (a).

Este ciclo sirve como referencia para comparar topologías avanzadas, como el ciclo de recompresión (RCC), que mejora la eficiencia al equilibrar las capacidades caloríficas mediante un recompresor y recuperadores de alta y baja temperatura se observa en la figura 1 (b) . Otro ciclo avanzado es el ciclo de recompresión con enfriamiento intermedio (RCMCI), que incorpora un sistema de enfriamiento intermedio para reducir las irreversibilidades en la compresión y adaptarse mejor a temperaturas de entrada al compresor variables (CIT) figura 1 (c). Por último, el ciclo de enfriamiento parcial con recompresión (PCRC) optimiza el flujo parcial para minimizar los desequilibrios térmicos figura 1 (d).

Figura 1
Ciclos de potencia Brayton





2.2 Dióxido de Carbono como fluido de trabajo

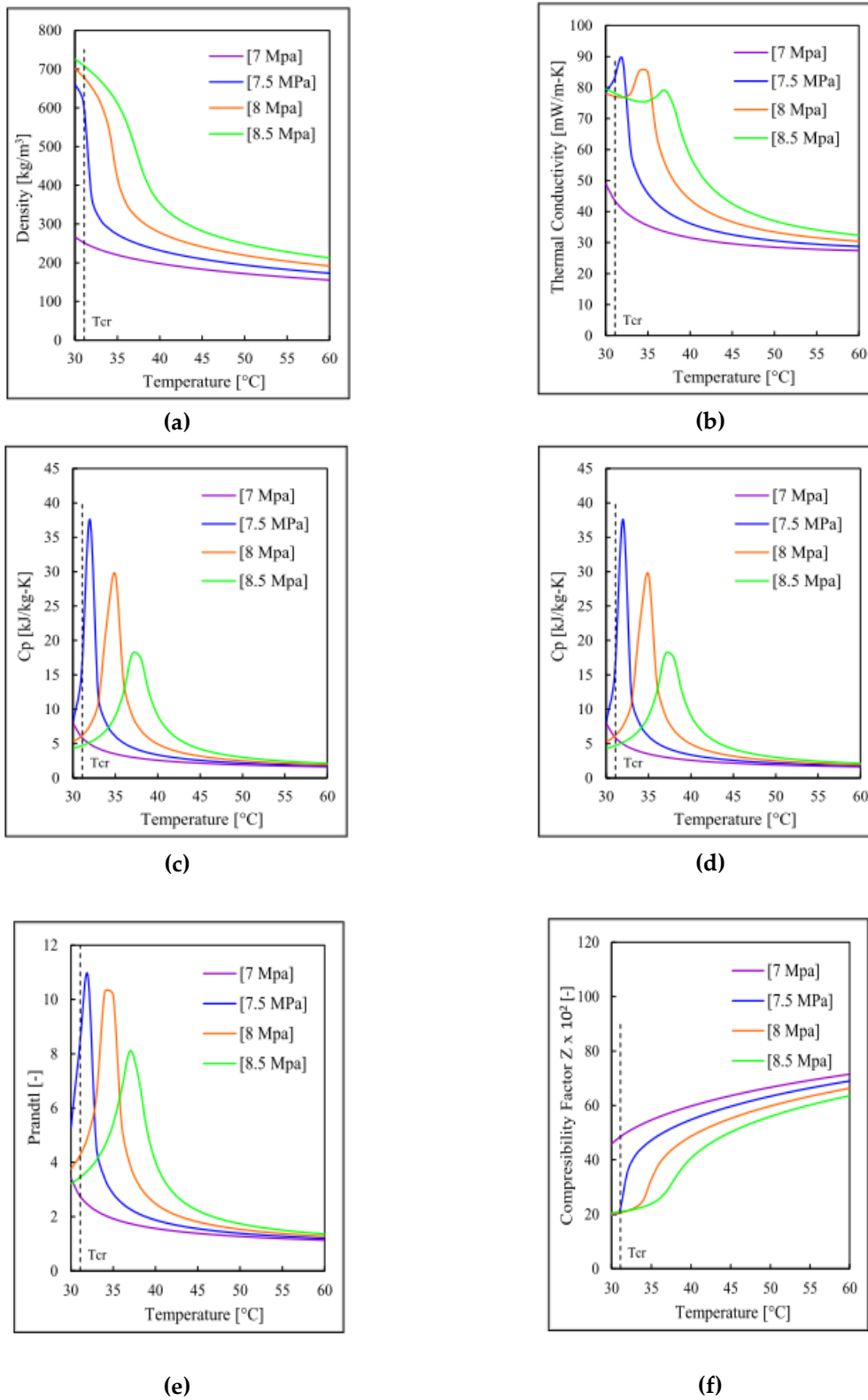
El dióxido de carbono supercrítico ha sido identificado como un fluido de trabajo atractivo y con numerosas ventajas, entre las que se incluyen su bajo coste, su inocuidad, su inalterabilidad, su abundancia y su fácil acceso a su punto crítico. Asimismo, su baja compresibilidad, viscosidad y alta densidad son características útiles para lograr altas eficiencias en estructuras mecánicas compactas. Por tanto, el s-CO₂ ha despertado el interés para su uso como fluido de trabajo en aplicaciones de generación de energía (Tafur Paúl et al., 2020), El dióxido de carbono (CO₂) exhibe una notable capacidad en los ciclos, lo que sugiere un papel potencialmente significativo en los procesos bioquímicos subyacentes.

En el estudio de (Tafur Paúl, 2024), se ha observado que los ciclos Brayton en un rango supercrítico, con temperaturas cercanas a los 31,1 °C y una presión de 73,8 bar. Estos resultados subrayan la importancia de considerar los valores críticos de temperatura y presión en el análisis de sistemas complejos. El valor de la temperatura se halla próxima a las condiciones ambientales en las que se ubica. En el estudio se aborda el tema de las plantas de energía solar concentrada y otras aplicaciones asociadas. El estado supercrítico se caracteriza por presentar una densidad significativamente menor en comparación con otros estados de la materia, lo que resulta en una mayor compresibilidad cuando se somete a condiciones de alta presión. En virtud

de lo anteriormente expuesto, se desprende que la compresión requiere de una cantidad menor de trabajo en comparación con el CO₂ en otros estados

Como se evidencia en la figura 2, el comportamiento termodinámico del dióxido de carbono (CO₂) en la proximidad de su punto crítico. En el estudio realizado por (Tafur Paul, 2024), se ha observado una variación drástica en las propiedades termofísicas en las inmediaciones del punto crítico, lo que sugiere la presencia de cambios significativos en los parámetros físicos en dicho punto. Desde la perspectiva del funcionamiento de los componentes, se evidencia una disminución acelerada en la densidad (ver Figura 2(a)). En la Figura 2(b), se observa el comportamiento de la conductividad térmica. En la Figura 2(c), se evidencia el comportamiento de la capacidad de calor específica a presión constante. En la Figura 2(d), se observa el comportamiento de la viscosidad. En la Figura 2(e), se evidencia el comportamiento del Prandtl. En la Figura 2(f), se observa el factor de compresibilidad. Desde la perspectiva del funcionamiento de los componentes

Figura 2
Propiedades del CO₂



Nota: Comportamiento de las propiedades termofísicas de dióxido de carbono en estado supercrítico

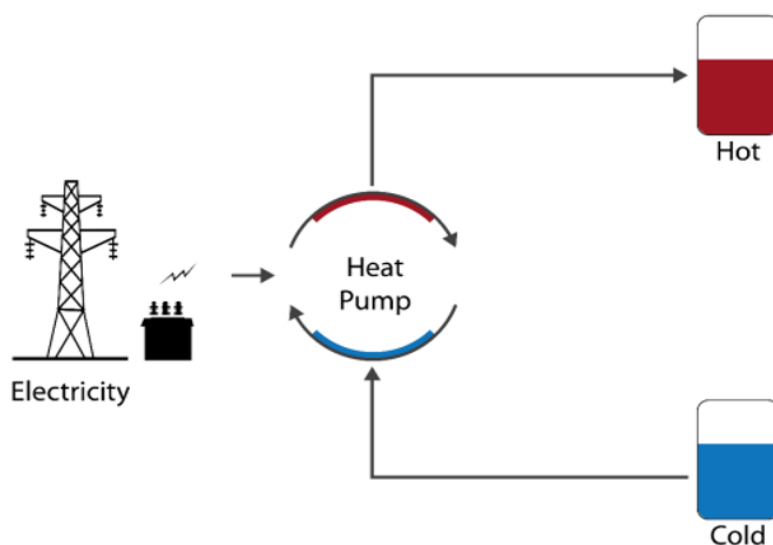
2.3 Funcionamiento de bombas de calor

Según (International Energy Agency, 2024) las bombas de calor son reconocidas progresivamente como una tecnología de suma relevancia para la descarbonización del sector de la transición energética, una bomba de calor hace uso de una tecnología comparable a la de un refrigerador o un sistema de aire acondicionado, pero en sentido inverso, es decir, extrae calor de una fuente y lo transfiere a la ubicación donde es requerido. Los modelos actuales exhiben una eficiencia energética que oscila entre tres y cinco veces superior a la de las calderas de gas. Adicionalmente, se ha observado un incremento constante en las ventas mundiales de bombas de calor durante la última década, aunque se evidenció una desaceleración en 2023, atribuida al aumento de las tasas de interés y la inflación las bombas de calor son reconocidas progresivamente como una tecnología de suma relevancia para la descarbonización del sector de la transición energética(Cox et al., 2023).

Como se evidencia en la figura 3, se muestra de manera esquemática el funcionamiento de una bomba de calor (Mctigue et al., 2019).

Figura 3

Funcionamiento de una bomba de calor.

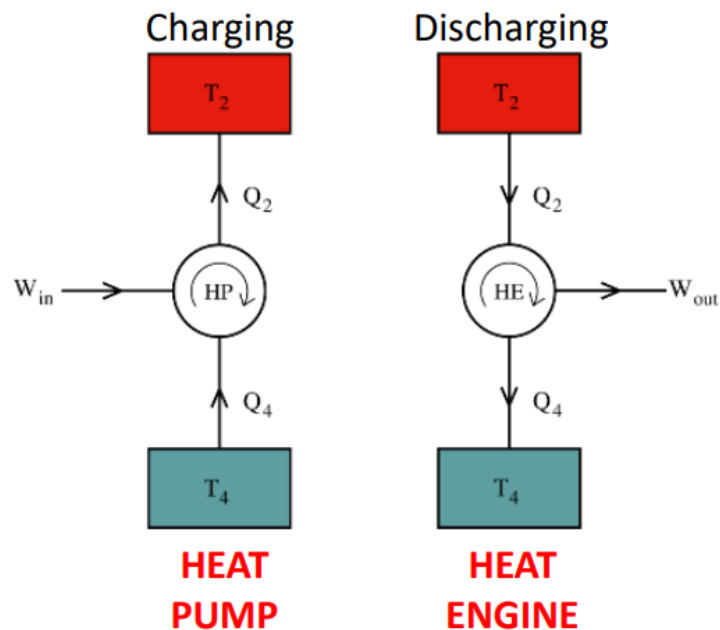


2.4 Baterías de Carnot

Las baterías de Carnot constituyen soluciones de almacenamiento de energía termo-mecánicas que efectúan la conversión de electricidad en calor exergético, con el propósito de almacenarlo y, a partir del calor obtenido, volver a generar electricidad mediante un ciclo termodinámico que aprovecha las diferencias de temperatura (Dai et al., 2025). Su funcionamiento se basa en la utilización de compresores/expansores, turbomáquinas, intercambiadores de calor y almacenamiento térmico (TES) para cargar, almacenar y descargar energía, ofreciendo un almacenamiento a gran escala y de larga duración con un potencial de mayor flexibilidad para redes con alta penetración de renovables. No obstante, su rendimiento está condicionado a la eficiencia de cada componente y a su integración (Dumont et al., 2020). El funcionamiento de las baterías de Carnot puede ser observado en la figura 4.

Figura 4

Esquema de funcionamiento de una batería térmica de Carnot durante las etapas de carga y descarga

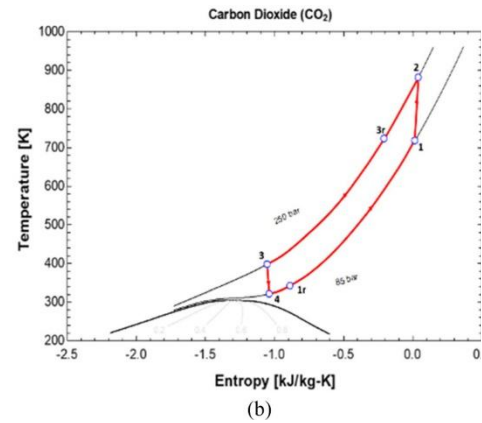
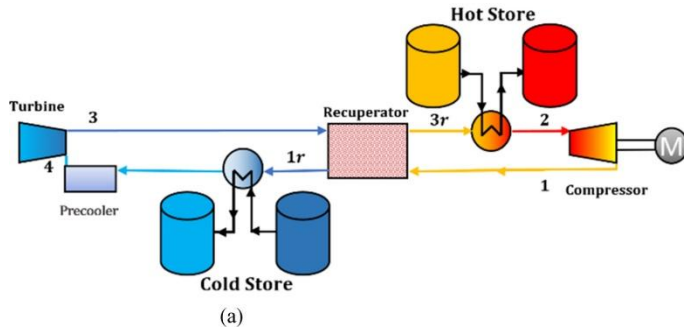
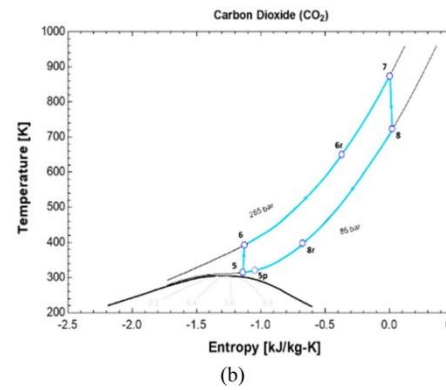
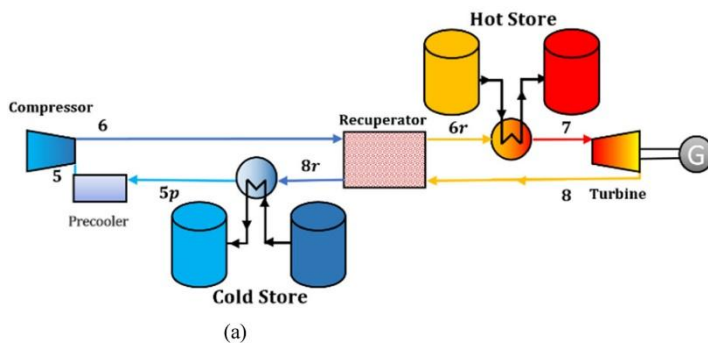


Nota: Gráfico sacado del NREL del funcionamiento de baterías de Carnot

2.5 Sistema de almacenamiento térmico por bombeo

En este contexto, para superar estas limitaciones son necesarias tecnologías de almacenamiento de energía eficientes y flexibles que garanticen la estabilidad de la red eléctrica cuando la electricidad se genera a partir de fuentes renovables, como solar, eólica. Los sistemas de almacenamiento de energía térmica por bombeo (PTES) han sugerido como una alternativa prometedora, ya que ofrecen alta eficiencia, unos costes de almacenamiento bajos y excelente escalabilidad (Held et al., 2024).

Un sistema de este tipo absorbe excedentes de electricidad de la red y la transforma en energía térmica mediante una bomba de calor. La energía térmica se almacena en tanques de sales fundidas y posteriormente se utiliza para alimentar un motor térmico, produciendo electricidad ((Tafur-Escanta et al., 2022). Actualmente, los sistemas más destacados emplean un ciclo Brayton (s-CO₂) y utilizan dióxido de carbono supercrítico como fluido de trabajo. En la investigación de (Tafur-Escanta et al., 2022a), ha demostrado el potencial de las bombas de calor con dióxido de carbono (CO₂) en cuanto a almacenamiento de energía eléctrica, y se ha puesto en manifiesto la eficiencia de dichos sistemas al integrar el almacenamiento térmico con la generación de electricidad. Como indican (Held et al., 2024) se experimentó un progreso notable en la investigación, mediante la evaluación a escala piloto de un sistema de almacenamiento de energía térmica por bombeo (PTES) transcrítico basado en (CO₂) y la corroboración de su eficiencia en funciones auténticas.

Figura 5*Sistema de carga (a) Sistema de descarga (b)***(a)****(b)**

Nota: Graficas del sistema de carga y de descarga de ciclos de recompresión Brayton

2.6 Algoritmo NSGA

Con el crecimiento de los problemas de optimización multiobjetivo en áreas como la ingeniería, la energía y la inteligencia artificial ha impulsado el desarrollo de algoritmos evolutivos más eficientes. En este contexto (Deb et al., 2002) propusieron el algoritmo NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) como una mejora significativa frente a su predecesor, el NSGA. Este nuevo enfoque resolvió tres deficiencias fundamentales del algoritmo original: la alta complejidad computacional, la ausencia de elitismo y la necesidad de parámetros adicionales para preservar la diversidad de soluciones.

CAPÍTULO II

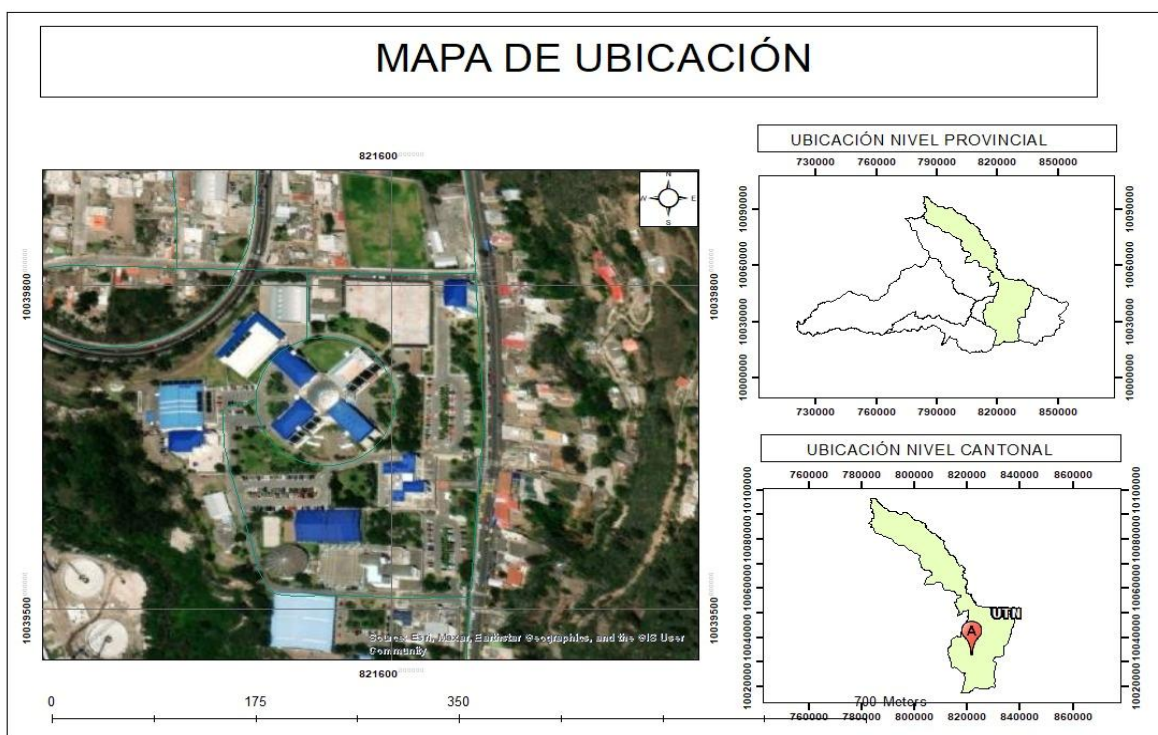
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El área de estudio está en la provincia de Imbabura, en la ciudad de Ibarra, campus El Olivo de la Universidad Técnica del Norte, en la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales (FICAYA) que alberga el Laboratorio de Energías Renovables.

Figura 6

Mapa de Ubicación



Nota: Esta imagen muestra una vista aérea de la Universidad Técnica del Norte diseñada en el software ArcGIS versión 10.8

3.2 Métodos

3.2.1 Descripción de sistema

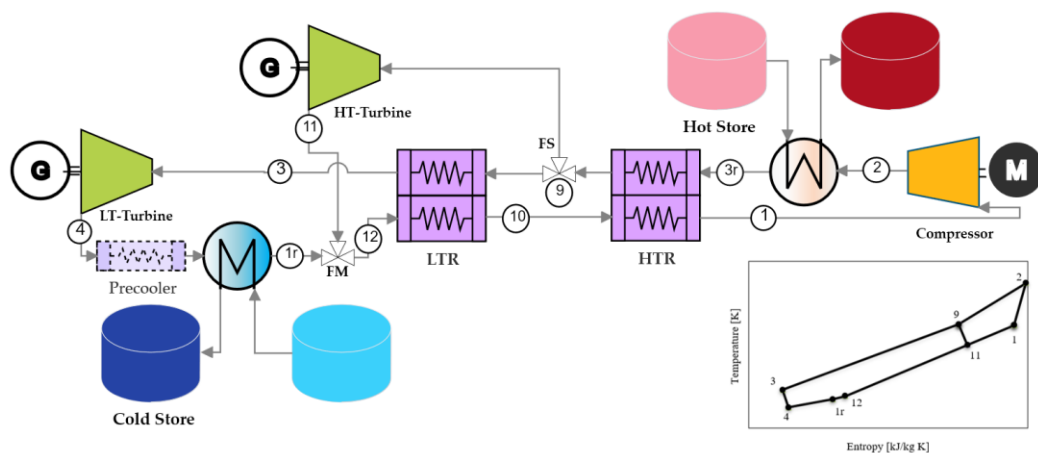
Este trabajo presenta el desarrollo del sistema PTES con el ciclo Brayton de recompresión (RBC), que representa una versión mejorada del ciclo Brayton recuperado (comúnmente designado como Brayton simple, SB) (Tafur, 2020).

Durante la carga, los sistemas PTES usan electricidad sobrante de las energías renovables para mover una bomba de calor. Esto calienta un tanque y enfría otro, almacenando energía en forma de calor y frío, que luego se puede usar para generar electricidad Figura 2 (a).

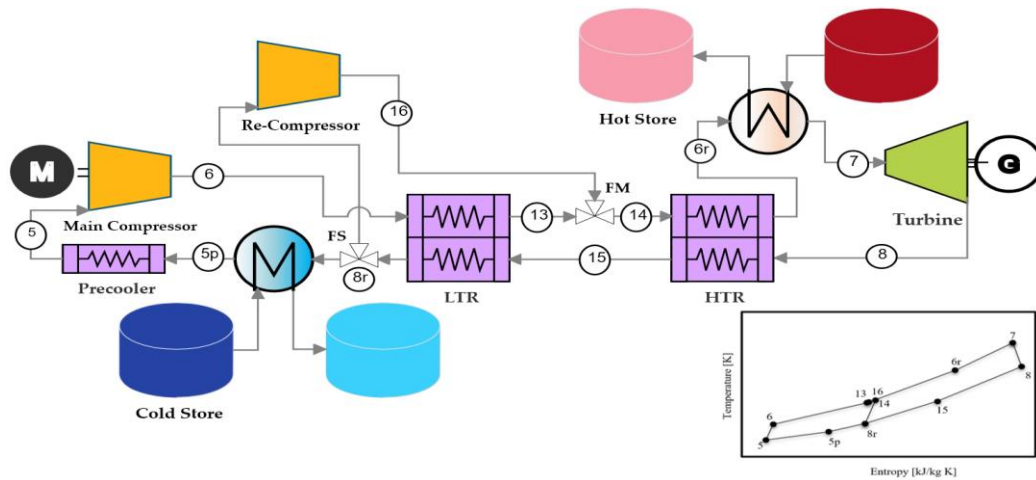
En el modo de descarga convierte la energía térmica almacenada en electricidad. El fluido de trabajo se calienta en el depósito caliente, se expande en una turbina generando electricidad, y luego se enfría en el depósito frío. Parte del fluido enfriado se dirige a un recompresor, que permite mejorar la eficiencia del ciclo al recuperar presión. (Valencia, 2022). Este proceso, basado en un ciclo Brayton reversible, permite recuperar la energía de forma eficiente y sin emisiones representada en la Figura 2 (b) (Tafur Paul, 2024).

Figura 7

Recompression Brayton cycle as PTES system. (a) etapa de carga, (b) etapa descarga.



(a)



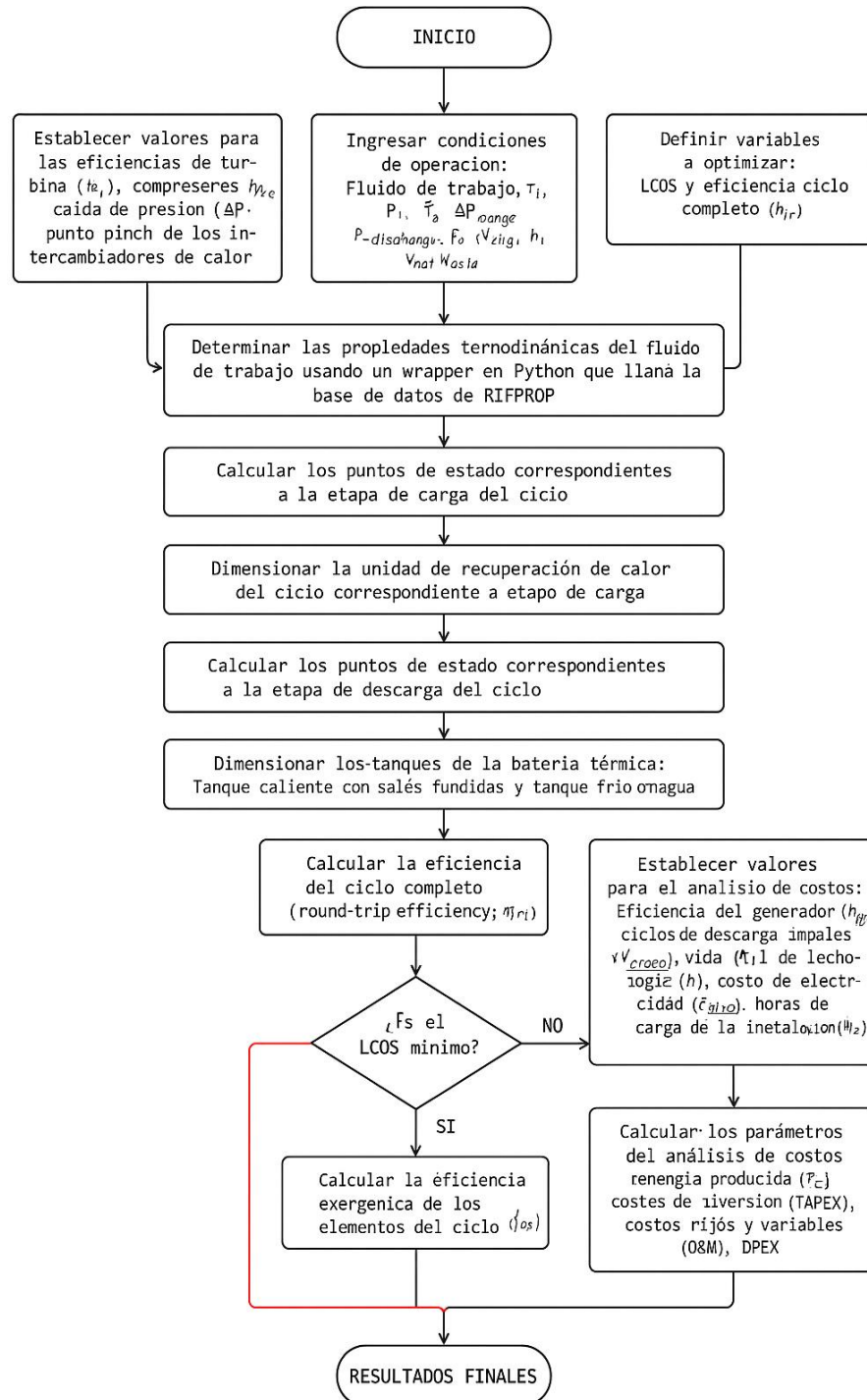
(b)

Este análisis se basa en la simulación del comportamiento de los ciclos Brayton mediante un software basado en un código desarrollado en MATLAB con una envoltura de Python. Así facilita el acceso a la base de datos que contiene las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo en REFPRO (Lemmon et al., 2013).

El objetivo de este proceso es optimizar una serie de variables como la temperatura de entrada a la turbina (T_7), la temperatura de entrada al compresor (T_5), la presión de entrada al compresor principal (P_5), incluidas el coste nivelado de almacenamiento (LCOS) y la eficiencia de round-trip este nos lleva a ocupar non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) con esta data se procede a hacer un diagrama de flujo para el análisis de estas variables como se observa en la figura 3.

Figura 8

Diagrama de flujo del código para el desarrollo de la investigación utilizando MATLAB y Python



Nota: Diagrama de flujo de simulación para la parametrización de las variables

optimiza

Se establecerán las suposiciones de entrada clave para el análisis, incluyendo parámetros técnicos y condiciones operativas, que se detallan en la tabla 1 para asegurar la coherencia y validez del análisis.

Tabla 1

Suposiciones de entrada clave para el análisis

	Parámetros	Valor	Unidades
Descarga neta de energía (Parisi et al., 2024; Smallbone et al., 2017; Tafur-Escanta, Valencia-Chapi, López-Guillem, et al., 2021)	$\dot{W}_{net}^{dis}$	10	MW
Presión de Entrada al Compresor	P_1 & P_5	Optimizado	MPa
Presión de entrada a la turbina	P_3 & P_7	Optimizado	MPa
Temperatura de entrada al compresor	T_1 & T_5	Optimizado	K
Temperatura de entrada a la turbina	T_3 & T_7	Optimizado	K
Eficiencia del compresor (Ma et al., 2023; Song et al., 2021; Valencia-Chapi et al., 2020; Wang et al., 2018)	η_c	0.80	-
Eficiencia de la turbina (Ma et al., 2023; Thada et al., 2021; Valencia-Chapi et al., 2020; Wang et al., 2018)	η_t	0.85	-
Relación de compresión de la carga	r_p^{ch}	Optimizado	-
Relación de compresión de descarga	r_p^{dis}	Optimizado	-
Pérdidas de carga del recuperador	$\Delta P/P_R$	1	%
Pérdidas de carga del preenfriador	$\Delta P/P_{PC}$	1	%
Pinch point (Tafur-Escanta, Valencia-Chapi, López-Paniagua, et al., 2021)	ΔT_{min}	5	K
Fracción másica de la carga dividida	γ^{ch}	Optimizado	%
fracción másica de la descarga dividida	γ^{dis}	Optimizado	%

El modelo de simulación del ciclo termodinámico Brayton se realizó un análisis estadístico mediante diagramas de dispersión (nubes de puntos), los cuales permitieron examinar visualmente el comportamiento de las variables termodinámicas clave del ciclo. Se analiza la temperatura de entrada a la turbina (T_7), que se encuentra en un rango operativo de 773,2 K a 993,2 K, lo cual es indicativo del régimen térmico al que se somete la etapa de

expansión. Asimismo, se considera el análisis de la temperatura de entrada al compresor (la temperatura de entrada al compresor (T_5), Esta temperatura, cuya variación oscila entre 305 K a 320 K, constituye un indicador clave de las condiciones iniciales del fluido antes de su paso por el proceso de compresión.

En lo que respecta a la presión de entrada al compresor principal (P_5), se analiza en un rango entre 74 a 84 bar, lo cual corresponde a los niveles de presión característicos en ciclos de alta eficiencia. Se realiza un análisis de la fracción másica gamma de dos estados operativos, en la fase de descarga se analiza en un intervalo que oscila entre 0.06 y 0.21, mientras que en la fase de carga se hace la parametrización en intervalos 0.06 y 0.25 esto nos demuestra cómo cambia la composición del fluido de trabajo en respuesta al sistema de funcionamiento.

El análisis se basó en una interpretación de datos donde cada punto en los gráficos de dispersión (nube de punto) representa una simulación a partir de varias iteraciones realizadas por el modelo de simulación con el algoritmo NSGA II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) para el modelo económico así se pudo analizar el (LCOS) o costo nivelado de almacenamiento.

Para evaluar la eficiencia energética del ciclo Brayton en sus fases operativas de carga y descarga, se emplea el concepto de eficiencia round-trip, que permite cuantificar el desempeño global del sistema térmico. En el presente estudio se aborda el análisis del comportamiento del ciclo durante las etapas de carga y descarga. En la primera etapa utiliza el coeficiente de rendimiento del sistema como se define en la ecuación 1. En contraste durante la segunda etapa la eficiencia térmica del ciclo Brayton se describe mediante la ecuación 2.

$$COP_{HP}^{chg} = \frac{\dot{Q}_{hot\ tank}^{chg}}{\dot{W}_{net}^{chg}} \quad (Ec.1)$$

- COP_{HP}^{chg} = Coeficiente de rendimiento del sistema durante la carga.
- $\dot{Q}_{hot\ tank}^{chg}$ = Flujo de calor entregado al tanque caliente [kW].
- $\dot{W}_{net}^{chg}$ =Potencia neta de entrada (energía eléctrica consumida) [kW].

$$\eta_{th}^{dis} = \frac{\dot{W}_{net}^{dis}}{\dot{Q}_{hot\ tank}^{dis}} \quad (Ec.2)$$

- $\dot{Q}_{hot\ tank}^{dis}$ = : Flujo de calor extraído del tanque caliente [kW].
- $\dot{W}_{net}^{dis}$ = Trabajo neto generado (salida eléctrica) [kW].
- η_{th}^{dis} =Eficiencia térmica durante la descarga.

Para evaluar la eficiencia exergética del ciclo Brayton, durante la etapa de carga se compara el desempeño real de la bomba de calor con su desempeño ideal bajo condiciones reversibles, lo que permite cuantificar las pérdidas en el almacenamiento de energía; mientras que en la etapa de descarga, la eficiencia exergética se determina a partir de la relación entre la eficiencia térmica real y la eficiencia máxima teórica reversible, identificando las irreversibilidades en la recuperación de energía. Estos procesos se describen matemáticamente en las ecuaciones 3 y 4, respectivamente (Robert Valencia et al., 2022).

$$\eta_{ex}^{chg} = \frac{COP_{HP}^{chg}}{COP_{ideal}^{chg}} \quad (Ec.3)$$

- η_{ex}^{chg} = Eficiencia exergética en carga.
- COP_{HP}^{chg} =COP real de la bomba de calor.

- COP_{ideal}^{chg} =: COP de la bomba de calor ideal (reversible).

$$\eta_{ex}^{dis} = \frac{\eta_{th}^{dis}}{\eta_{ideal}^{dis}} \quad (Ec.4)$$

- η_{ex}^{dis} = Eficiencia exergética en descarga.
- η_{th}^{dis} = Eficiencia térmica real.
- η_{ideal}^{dis} = Eficiencia térmica ideal (máxima teórica bajo condiciones reversibles).

En las previas investigaciones se realizaron un análisis de costos utilizando la fórmula del (LCOS) Coste nivelado de almacenamiento que se visualiza en la ecuación 5. En esta investigación, se adoptó una ley de potencia para modelar la correlación de costos, permitiendo estimar el LCOS en función de variables técnicas y económicas del sistema de almacenamiento (Deb et al., 2002).

$$LCOS = \frac{CAPEX}{\dot{E}_{dis} \cdot \sum_n^N \frac{1}{(1+r)^n}} + \frac{OPEX}{\dot{E}_{dis}} + \frac{C_{elec}}{\eta_{rt}} \quad (Ec.5)$$

- $CAPEX$ = Costo de inversión inicial del sistema de almacenamiento (equipos, instalación, etc.).
- $\dot{E}_{dis}$ = Energía útil descargada anualmente del sistema [por ejemplo, MWh/año].
- $\sum_n^N \frac{1}{(1+r)^n}$ = Suma descontada de cada año durante la vida útil del proyecto N, considerando una tasa de interés r. Representa el valor presente neto de los flujos anuales.

- $OPEX$ = Costos operativos anuales del sistema (mantenimiento, operación, reemplazos menores, etc.).

- C_{elec} = Costo de la electricidad que se usa para cargar el sistema de almacenamiento.

- η_{rt} = Eficiencia global del sistema, considerando tanto el proceso de carga como descarga (valor entre 0 y 1).

Para el cálculo de la eficiencia round-trip, se considera la relación entre la energía eléctrica neta generada durante la etapa de descarga y la energía eléctrica neta consumida durante la etapa de carga. Esta métrica proporciona una medida del aprovechamiento global del sistema de almacenamiento, reflejando cuánta de la energía almacenada puede recuperarse efectivamente. En esta investigación, la eficiencia round-trip se determina a partir de la ecuación número 6.

$$\eta_{rt} = \frac{\dot{W}_{net}^{dis} \cdot H_{dis}}{\dot{W}_{net}^{chg} \cdot H_{chg}} \quad (Ec.6)$$

- η_{rt} = Representa la proporción de energía útil recuperada en la descarga respecto a la energía consumida en la carga, considerando también el tiempo de operación. Es una medida global del desempeño del sistema.

- $\dot{W}_{net}^{dis}$ = Potencia neta generada durante la fase de descarga del ciclo [kW].

- $\dot{W}_{net}^{chg}$ = Potencia neta consumida durante la fase de carga del ciclo [kW].

- H_{chg} = Duración de la fase de carga [h].

- H_{dis} = Duración de la fase de descarga [h].

3.3 Validación del Modelo

Garantizar la exactitud de estos modelos es fundamental para asegurar la fiabilidad de los resultados y análisis de las simulaciones posteriores. Los sistemas analizados en este estudio guardan una estrecha semejanza con los descritos en (Yang & Du, 2025). En consecuencia, se emplean los datos de (Yang & Du, 2025) para validar los modelos.

Los resultados del proceso de validación se exponen en la Tabla 2. Los resultados obtenidos evidencian una congruencia satisfactoria entre los resultados de la simulación y los datos existentes provenientes de fuentes bibliográficas. La concordancia observada corrobora la credibilidad de los modelos desarrollados en el presente estudio.

Tabla 2

Resultados de la validación del modelo

Parámetro	Unidad	Referencia (Yang & Du, 2025)	Este Trabajo	Error [%]
CIP^{dis}	MPa	7.75	7.75	0.00
CIT^{dis}	K	843	843	0.00
r_p^{ch}	-	3.871	3.871	0.00
r_p^{dis}	-	3.805	3.805	0.00
γ^{chg}	-	0.55	0.55	0.00
γ^{dis}	-	0.32	0.32	0.00
η_c	%	90	90	0.00
η_t	%	90	90	0.00
η_{rt}	%	70.70	69.33	1.93

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de sensibilidad de la temperatura de entrada al compresor

3.1.1 Mínimo Costo nivelado de almacenamiento LCOS

La figura 9 presenta un diagrama de dispersión en el que se evalúa la influencia de la temperatura de entrada al compresor (CIT) en el rendimiento del sistema de recompresión de ciclos Brayton por bombeo, teniendo en cuenta el criterio de optimización: minimizar el (LCOS). En la figura 9 (a), se observa que la eficiencia round-trip (η_{rt}) oscila entre 0.53 y 0.60, con una ligera disminución a medida que aumenta la temperatura de entrada al compresor. por otro lado, la figura 9 (b) muestra que el LCOS (coste nivelado de almacenamiento) aumenta progresivamente con la temperatura de entrada al compresor (CIT), partiendo de valores cercanos a 148 \$/MWh y alcanzando hasta 170 \$/MWh.

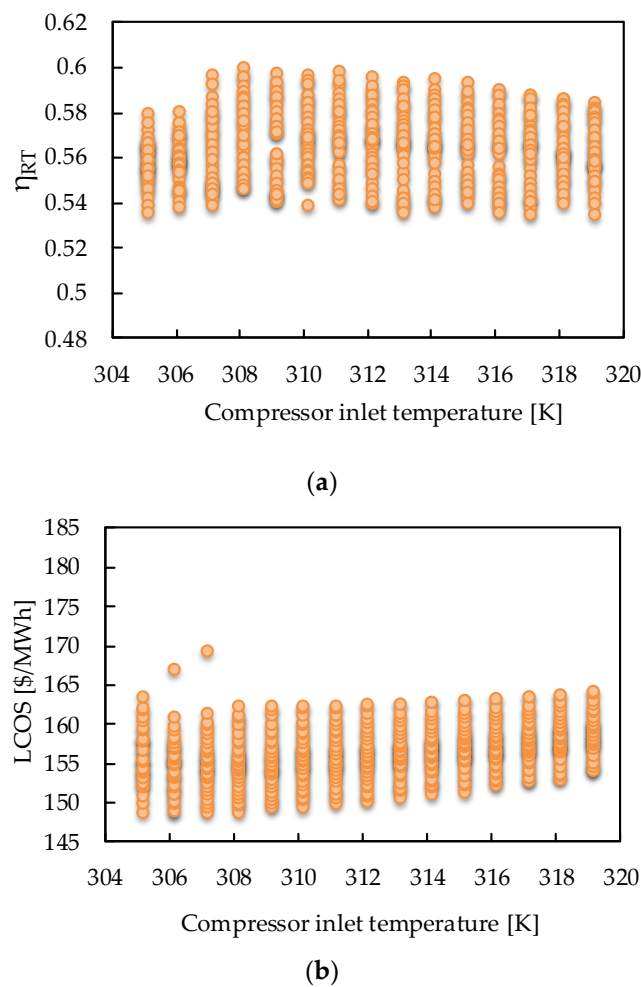
El diagrama de dispersión refleja la sensibilidad del sistema a las condiciones de funcionamiento, destacando que los valores más bajos de temperatura de entrada al compresor (CIT) permiten simultáneamente mejorar la eficiencia round-trip y reducir los costes de almacenamiento. En el presente estudio se ha determinado que el LCOS mínimo se alcanza con una temperatura de entrada al compresor de 307.1 K y también logramos que el coste nivelado se fija en 148.72 \$/MWh, con una eficiencia round-trip de 57.1%

Desde una perspectiva termodinámica se ha observado que un CIT más bajo reduce la carga de trabajo específica de la compresión lo que a su vez reduce las irreversibilidades asociadas y mejora la eficiencia energética del sistema. Este fenómeno se manifiesta como eficiencia round-trip y una reducción directa en el LCOS. En contraste, a medida que se incrementa el CIT, el compresor opera más allá de las condiciones críticas del dióxido de carbono esto aumento las pérdidas de exergía igualmente una mayor generación de costes

asociados con el almacenamiento de energía. En la actual investigación se llega a confirmar que el CIT constituye un factor primordial para optimizar el rendimiento de RBC-PTES, esto dándole una mayor importancia para el diseño ya que influyen significativamente en el rendimiento general del sistema.

Figura 9

Impacto en la temperatura de entrada al compresor. (a) Round-trip efficiency vs. CIT and (b) LCOS vs. CIT.



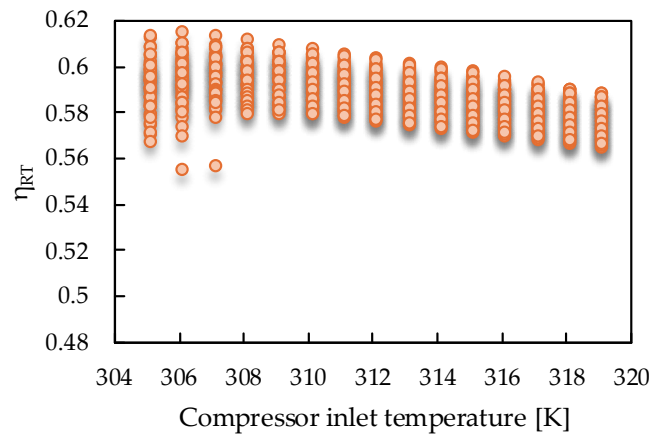
3.1.2 Máxima eficiencia Round-trip

La figura 10 muestra que, al dar prioridad a la maximización de la eficiencia round-trip. Los valores alcanzados son de alrededor de 0.615 y se concentran en torno a temperaturas de entrada al compresor de 306.1 k como se observa en la figura 10 (a). El funcionamiento en una

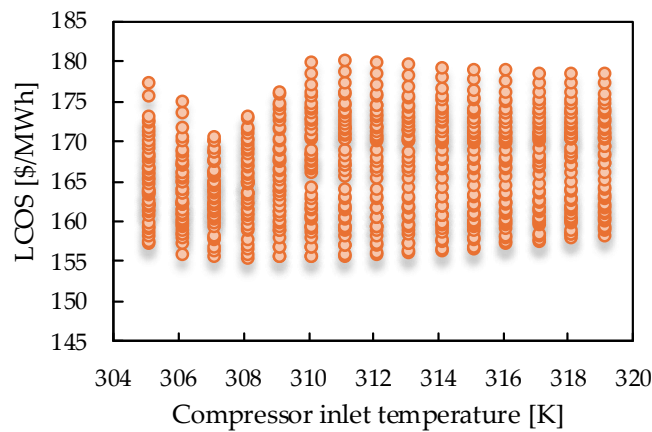
zona cercana al punto crítico del fluido del trabajo da como resultado un menor trabajo de compresión y un uso más eficiente de los recuperadores, lo que aumenta la eficiencia general del sistema. Sin embargo, se observa que estas condiciones tienden a estar asociadas al LCOS ligeramente más alto como se observa en la figura 10 (b), lo que confirma la relación inherente entre la eficiencia energética y el coste económico. El sistema alcanza un valor máximo del 61.5%, correspondiente a un LCOS de 158,4 \$/MWh, situado en un CIT de 306.1 K.

Figura 10

Impacto en la temperatura de entrada al compresor. (a) Round-trip efficiency vs. CIT and (b) LCOS vs. CIT.



(a)



(b)

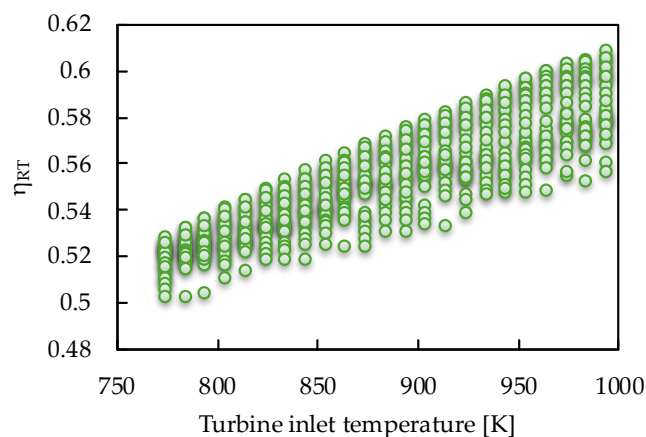
3.2 Análisis de sensibilidad de la temperatura de entrada a la turbina

3.2.1 Mínimo Costo Nivelado de Almacenamiento (LCOS)

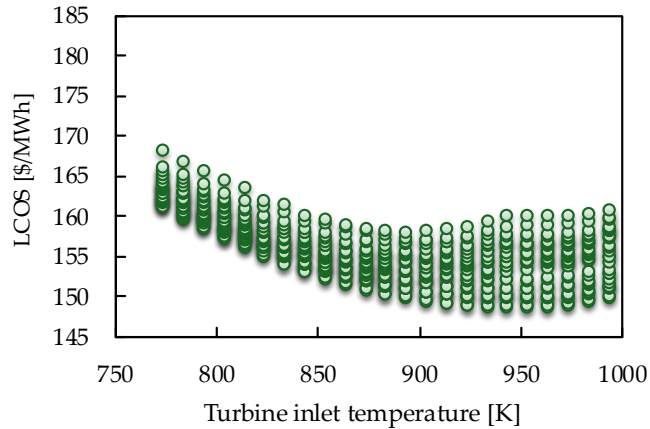
La figura 11 presenta un análisis paramétrico del impacto de temperatura de entrada de la turbina (TIT) en la eficiencia round-trip y el LCOS. Ambos gráficos se construyeron como puntos dispersos, lo que permite visualizar la densidad de los escenarios explorados en el espacio de diseño. La figura 11 (a) muestra una tendencia al alza en la eficiencia round-trip al aumentar la temperatura de entrada a la turbina. La optimización de la eficiencia se relaciona con un incremento en la energía disponible en el flujo de entrada a la turbina, lo que resulta en una disminución de la irreversibilidad del sistema. No obstante, esta ventaja no se manifiesta de manera directa en términos económicos. En el análisis presentado en la figura 11 (b), el LCOS exhibe una curva en forma de U con un valor mínimo que oscila en torno a los 953.2 K. Esto nos sugiere la presencia de un punto de equilibrio en el que la optimización de la eficiencia energética contrarresta los costos adicionales asociados al diseño de componentes de alta temperatura tales como los recuperadores de calor

Figura 11

Impacto en la temperatura de entrada a la turbina. (a) Round-trip efficiency vs. TIT and (b) LCOS vs. TIT



(a)



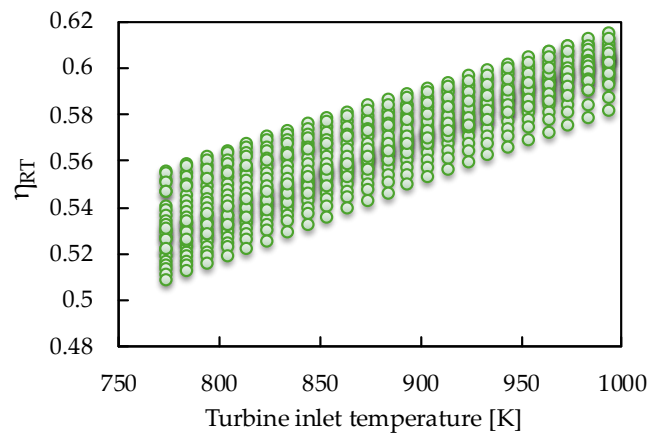
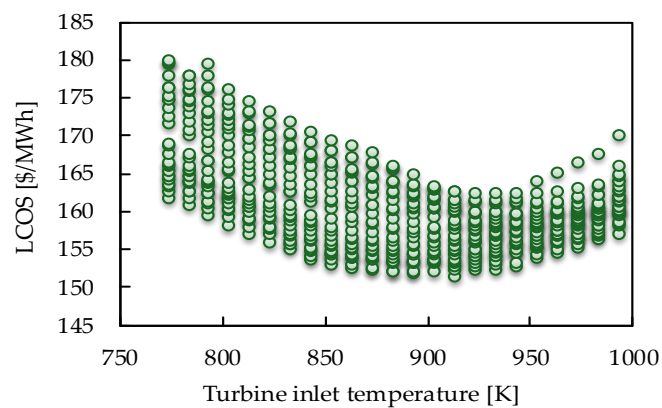
(b)

3.2.2 Máxima eficiencia Round-trip

La figura 12 presenta un análisis de sensibilidad paramétrica del sistema ante variaciones en la temperatura de entrada a la turbina, utilizando la eficiencia round-trip como criterio principal de la optimización. Como se observa en la figura 12 (a) existe una tendencia al alza en la eficiencia round-trip con respecto a la TIT, lo que indica que con altas temperaturas de entrada a la turbina aumentan el rendimiento general del sistema. Un aumento de la Temperatura de entrada a la turbina mejora el trabajo específico del sistema y reduce la generación de entropía en la etapa de descarga. La figura 12 (b) muestra que el LCOS presenta una forma de U con respecto a la temperatura de entrada a la turbina. Aunque el LCOS disminuye inicialmente al aumentar el TIT debido a una mayor eficiencia y menores pérdidas de energía, alcanza un valor mínimo y luego vuelve a aumentar. La temperatura de entrada a la turbina optima, desde el punto de vista de la maximización de la eficiencia round-trip, se sitúa en 993.2 K, con una Temperatura de entrada al compresor de 306,1 K, pero con una presión de entrada del compresor (P_5) de 77 bat, donde el rendimiento y el coste del sistema se mantienen equilibrados

Figura 12

Impacto en la temperatura de entrada a la turbina. (a) Round-trip efficiency vs. TIT and (b) LCOS vs. TIT.

**(a)****(b)**

3.3 Análisis de sensibilidad de la presión de entrada al Compresor

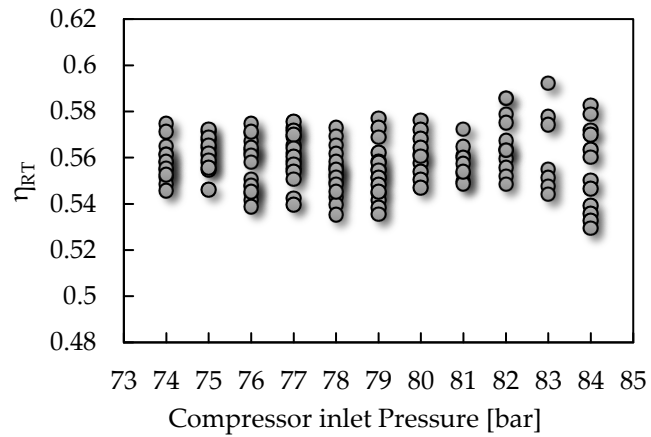
3.3.1 Mínimo Costo Nivelado de Almacenamiento (LCOS)

La figura 13 muestra el efecto de la presión de entrada del compresor (CIP) sobre la eficiencia round-trip y el LCOS. Los resultados indican que, si bien la CIP tiene impacto limitado sobre η_{rt} , que se mantiene dentro de un rango estrecho entre 0.53 y 0.592 (véase la figura 13 (a)), el LCOS es claramente más sensible. Los valores más bajos de LCOS, cercanos a 148 \$/MWh, se observan cuando la presión de entrada al compresor (CIP) está entre 74 y 77 bar como se muestra en la figura 13 (b), lo que demuestra que operar a presiones más bajas favorece la reducción de costos. Este comportamiento está asociado con una disminución del

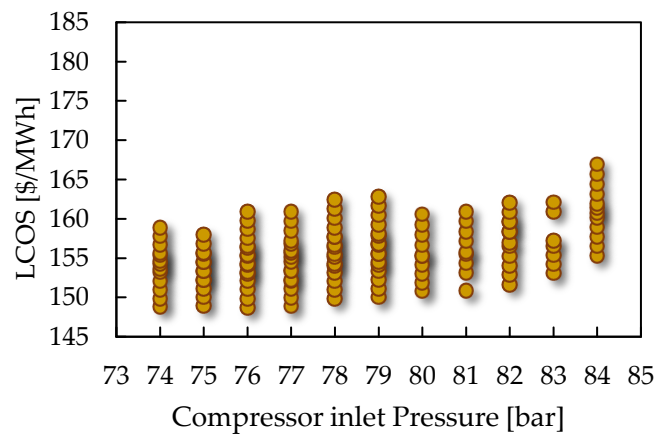
trabajo de compresión y, en consecuencia, de las irreversibilidades del ciclo, lo que mejora el rendimiento económico incluso si las mejoras en la eficiencia son relativamente limitadas.

Figura 13

Impacto en la presión de entrada al compresor. (a) Round-trip efficiency vs. CIP and (b) LCOS vs. CIP



(a)



(b)

3.3.2 Máxima eficiencia Round-trip

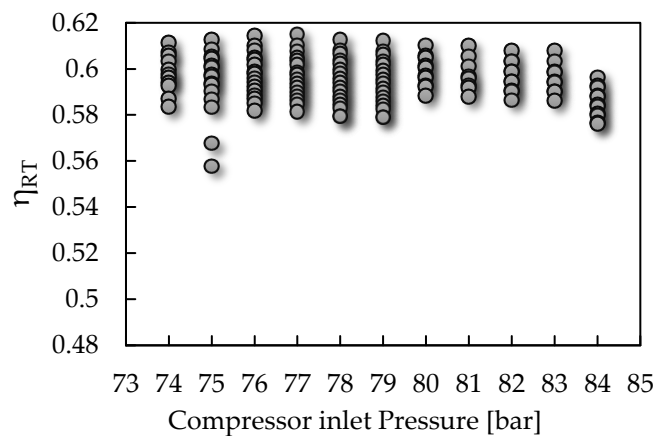
En la figura 14 presenta la sensibilidad de la presión de entrada al compresor a la eficiencia round-trip y el LCOS. El diagrama de dispersión de la figura 14 (a) muestra que la eficiencia round-trip y el LCOS. El diagrama de dispersión de la figura 14 (a) muestra que la eficiencia alcanza su valor máximo, alrededor del 61,2%, cuando la presión de entrada se mantiene entre 75 y 79 bar. No obstante, conforme se incrementa la presión por encima de este rango, la eficiencia experimenta una disminución gradual, lo cual nos muestra un aumento de

las irreversibilidades asociadas al proceso de compresión y, en consecuencia, un consumo de energía del ciclo más eficiente.

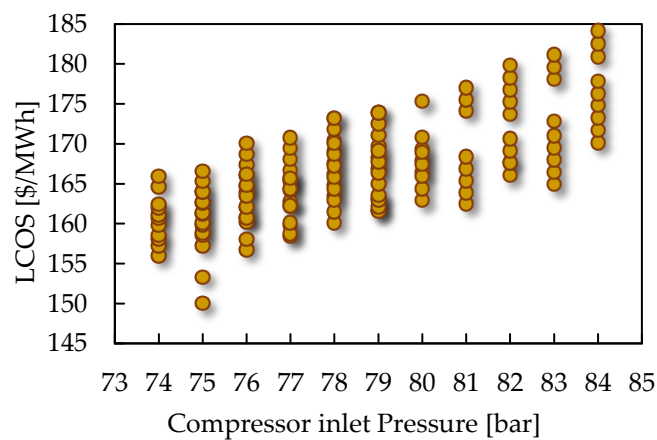
Paralelamente, la figura 14 (b) evidencia que este comportamiento termodinámico origina un incremento notable en el LCOS, el cual se expande de manera constante con la presión. Este análisis evidencia que maximizar la eficiencia round-trip, resulta imperativo operar con presiones moderadas de entra al compresor, incluso si conlleva incurrir en costos de almacenamiento relativamente inferiores, sin comprometer el rendimiento del sistema.

Figura 14

Impacto en la presión de entrada al compresor. (a) Round-trip efficiency vs. CIP and (b) LCOS vs. CIP



(a)



(b)

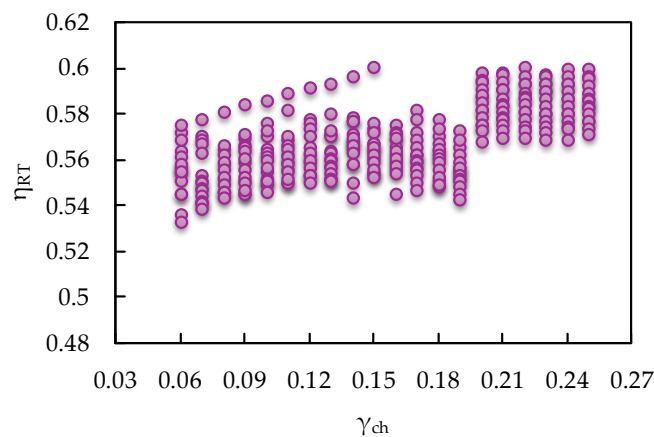
3.4 Análisis sensible de la fracción másica de carga

3.4.1 Mínimo Costo nivelado de almacenamiento (LCOS)

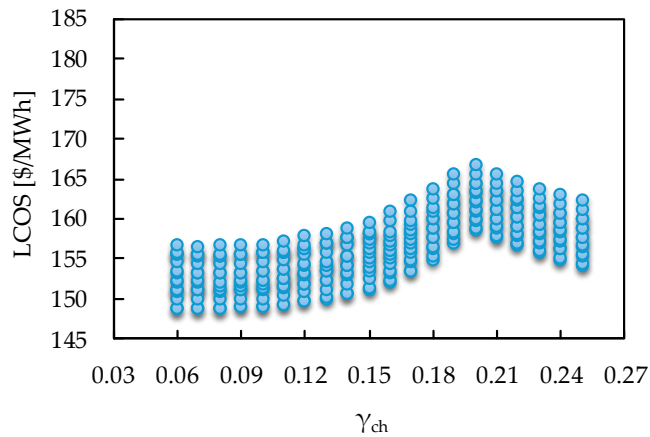
En la figura 15 se presenta un diagrama de dispersión que ilustra el efecto de la fracción másica de carga (γ_{ch}) sobre la eficiencia round-trip y el LCOS. Este parámetro regula la distribución del flujo masico entre las líneas de turbina de alta y baja presión del sistema RBC-PTES durante la etapa de carga, lo que afecta directamente a la entalpía disponible para la posterior recuperación de energía. En la figura 15 (a) se observa un ligero aumento de la eficiencia round-trip al aumentar (γ_{ch}), debido a una mejor explotación del gradiente de presión, aunque con una dispersión notable que indica sensibilidad a otros parámetros del sistema. Sin embargo, en la figura 15 (b), el comportamiento del LCOS muestra un mínimo claro en $\gamma_{ch} = 0.07$, con un de CIT = 306.1 K, a TIT = 953.2 K, and a $P_5 = 76$ bar, lo que sugiere una relación de ramificación óptima que equilibra los costos de compresión y expansión dentro del sistema

Figura 15

Impacto en la fracción másica de carga. (a) Round-trip efficiency vs. γ_{ch} , and (b) LCOS vs. γ_{ch} ,



(a)



(b)

3.4.2 Máxima eficiencia Round-trip

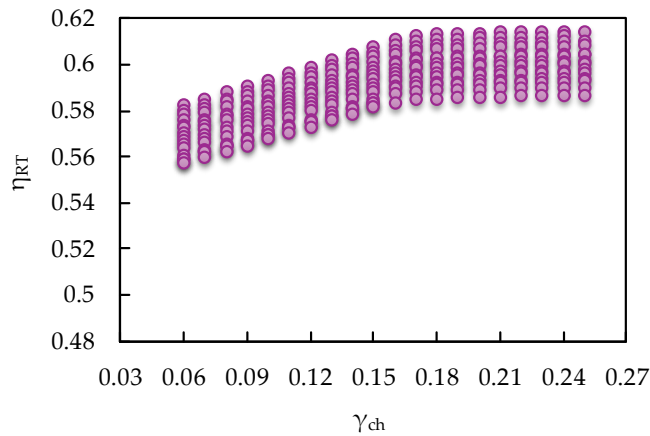
En el análisis presentado en la figura 16 (a), se observa una correlación positiva entre γ_{ch} y la eficiencia round-trip, con un comportamiento creciente y ligeramente curvilíneo. En este sentido, una mayor proporción de fluido dirigido hacia la turbina de alta presión en la etapa de carga permite el mejor aprovechamiento del gradiente de entalpía, lo que se traduce en una mayor capacidad de recuperación de energía durante la etapa de carga. Es decir, a medida que aumenta γ_{ch} , se alcanza una mayor presión en el sistema de carga, lo que mejora la transferencia de calor en los intercambiadores y aumenta la red recuperada durante la descarga. Por el contrario, la figura 16 (b) revela que el LCOS muestra una tendencia creciente con respecto γ_{ch} , aunque con un mínimo aparente cerca de $\gamma_{ch} = 0.07$ (en constancia con la figura 16 (b)). Este aumento del LCOS puede atribuirse al costo energético adicional asociado al manejo de caudales más altos en la turbina de alta presión, lo que aumenta la demanda eléctrica durante la fase de carga y, en consecuencia, el LCOS. La eficiencia máxima round-trip del 61.5% se alcanza un $\gamma_{ch}=0.25$ y un CIT= 306.1 K.

Este análisis destaca la importancia de seleccionar de manera óptima el γ_{ch} de acuerdo con el objetivo del diseño ya sea maximizar la eficiencia del sistema o minimizar los costos de almacenamiento. El punto de operación ideal no será el mismo dependiendo de si el sistema

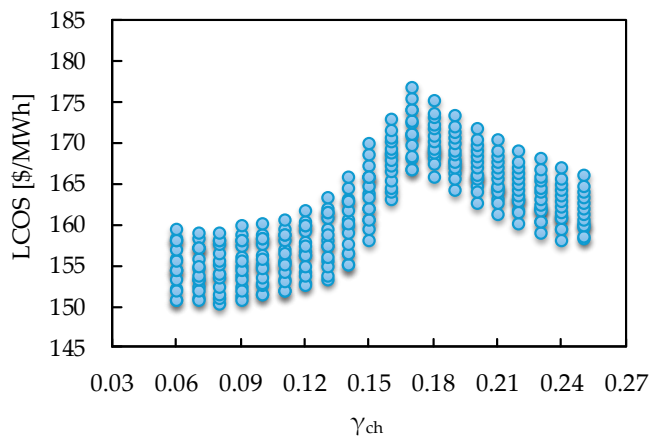
está diseñado para maximizar la recuperación de energía o para garantizar la competitividad económica frente a tecnologías alternativas.

Figura 16

Impacto en la fracción másica de carga. (a) Round-trip efficiency vs. γ_{ch} , and (b) LCOS vs. γ_{ch} .



(a)



(b)

3.5 Análisis sensible de la fracción de masa de descarga

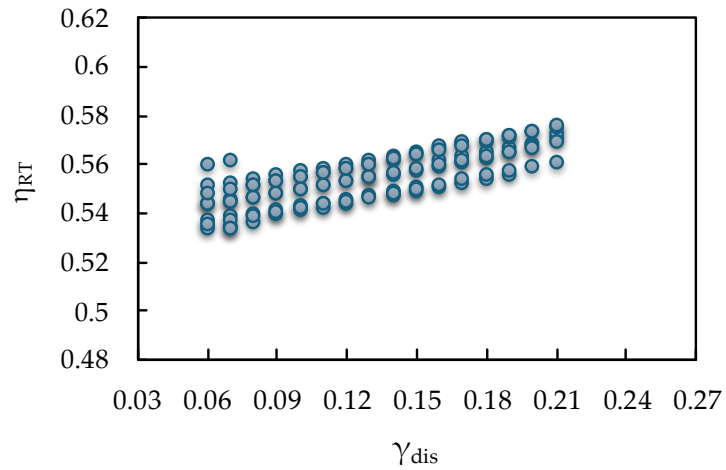
3.5.1 Mínimo Costo Nivelado de Almacenamiento (LCOS)

La fracción másica γ_{dis} representa la fracción de fluido desviada al recompresor durante la etapa de descarga del sistema RBC-PTES. Como se muestra en la figura 17, el valor óptimo para minimizar LCOS es de $\gamma_{dis} = 0.21$. En este punto, el sistema logra un equilibrio favorable entre la eficiencia energética y los costos operativos derivados del trabajo de recompresión. Un

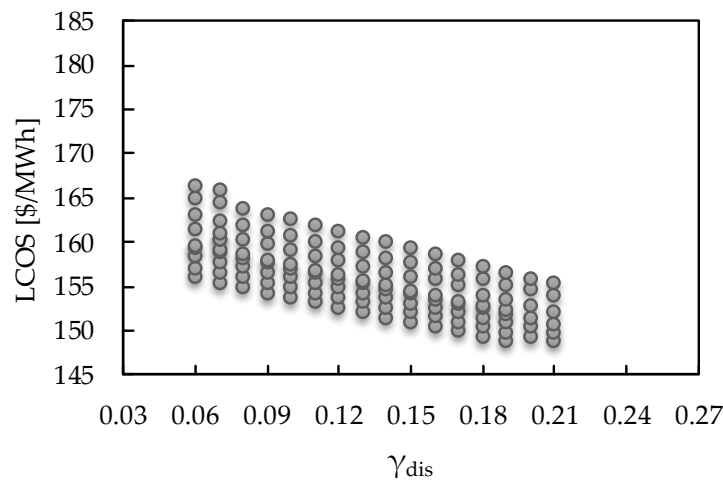
bypass directo mas bajo al recompresor implica una mayor proporción del fluido dirigido al compresor principal, lo que aumenta las irreversibilidades debido a la generación de entropía, disminuye la eficiencia round-trip y aumenta el LCOS.

Figura 17

Impacto en la fracción másica de descarga. (a) Round-trip efficiency vs. γ_{dis} , and (b) LCOS vs. γ_{dis} .



(a)



(b)

3.5.2 Máxima eficiencia Round-trip

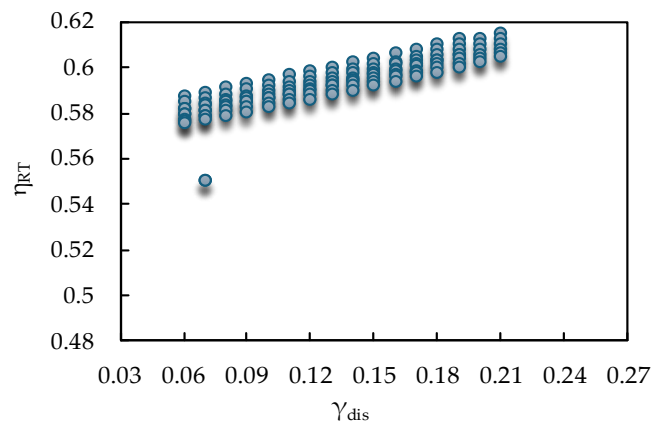
La Figura 18 (a) muestra que, a medida que aumenta. γ_{dis} , la eficiencia Round-trip aumenta de forma constante. El valor óptimo de. γ_{dis} que maximiza la eficiencia round-trip es 0,21, lo que representa una condición de funcionamiento favorable para aprovechar la energía

almacenada. Este comportamiento puede explicarse por una mejor gestión del flujo de entropía dentro de la etapa de descarga. Al permitir que una mayor fracción del fluido se redirija al recompresor, se reduce la generación de irreversibilidades asociadas a la generación de entropía en estos componentes. Esta estrategia mejora la eficiencia exergética del sistema al reducir las pérdidas térmicas durante la expansión y recompresión.

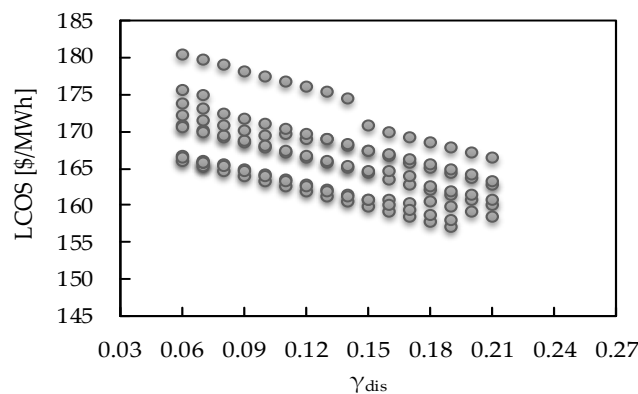
La Figura 18 (b) muestra cómo varía el LCOS en función de la fracción de masa dirigida al recompresor en modo de descarga. A medida que aumenta γ_{dis} , el LCOS disminuye de forma constante, alcanzando un mínimo en $\gamma_{dis} = 0,19$, lo que indica que este valor representa un punto de funcionamiento favorable desde una perspectiva económica

Figura 18

Impacto en la fracción másica de descarga. (a) Round-trip efficiency vs. γ_{dis} , and (b) LCOS vs. γ_{dis} .



(a)



(b)

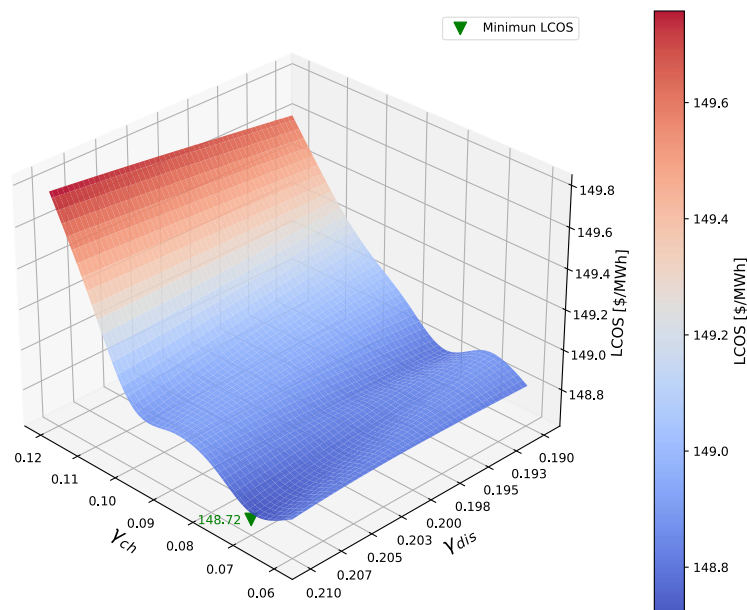
3.6 Análisis de sensibilidad tridimensional

3.6.1 Mínimo Costo Nivelado de Almacenamiento (LCOS)

La Figura 19 muestra la influencia de dos parámetros: la fracción de masa dirigida a la turbina de alta presión (γ_{chg}) y la fracción de masa dirigida al recompresor (γ_{dis}) sobre el LCOS del sistema RBC-PTES. Se observa que el LCOS disminuye progresivamente a medida que aumenta γ_{chg} , alcanzando su valor mínimo de 148,72 \$/MWh en la región donde coinciden los valores altos de γ_{chg} y γ_{dis} . Esto demuestra que la reducción de las pérdidas irreversibles durante el proceso de compresión y transferencia de calor en la etapa de carga es clave para mejorar la competitividad económica del sistema.

Figura 19

Impacto de la proporción de carga y descarga en el LCOS.



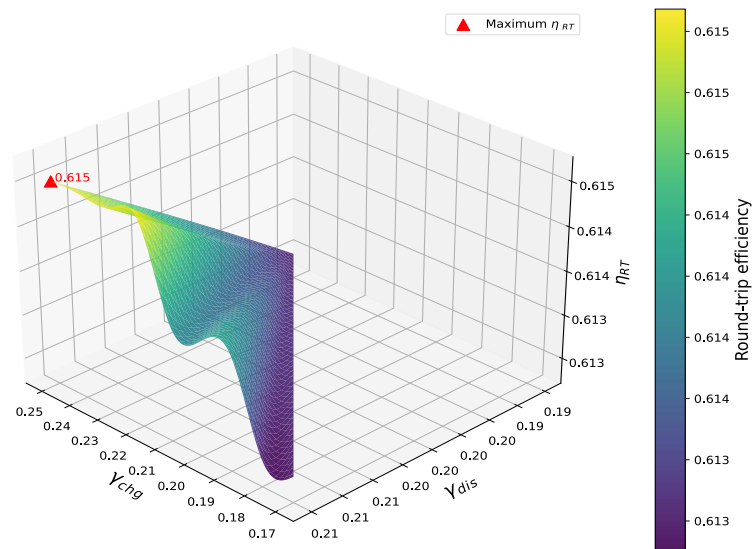
3.6.2 Máxima Eficiencia Round-trip

La Figura 20 presenta la superficie de optimización correspondiente a la eficiencia round-trip (η_{RT}) en función de las fracciones de masa durante la carga (γ_{chg}) y la descarga (γ_{dis}). El punto de máxima eficiencia, identificado como $\eta_{RT}=61,5\%$, se alcanza para $\gamma_{chg}=0,25$ y $\gamma_{dis}=0,21$. La tendencia general del gráfico indica que la eficiencia es sensible a

las variaciones de la fracción másica durante el proceso de carga, mientras que la influencia de la descarga es menos pronunciada cerca del valor óptimo. Este fenómeno puede interpretarse como indicativo del impacto predominante del equilibrio de flujo durante la etapa de recompresión en la reducción de la irreversibilidad global. Dentro del rango de valores analizados, un aumento de (γ_{chg}) favorece una mayor recuperación de energía en el recuperador de calor, mitigando así las pérdidas asociadas a los gradientes térmicos. Sin embargo, la observación de que la condición óptima para γ_{dis} permanece constante en aproximadamente 0,21 indica que el potencial de mejora durante la expansión es comparativamente limitado, emergiendo el trabajo de compresión como la variable fundamental para mejorar la eficiencia.

Figura 20

Impacto de la proporción de carga y descarga en la eficiencia round-trip.



3.7 Comparación de eficiencia Exergética

La Figura 21 presenta el análisis comparativo de la eficiencia exergética de los principales componentes del sistema RBC-PTES bajo dos criterios de optimización: minimización del LCOS (Figura 21-a, b) y maximización de la eficiencia round-trip (Figura 21-c, d). En el caso de la optimización mínima orientada al LCOS, se observa que durante la fase de carga (Figura 21-a), el tanque caliente alcanza eficiencias cercanas a la unidad, mientras

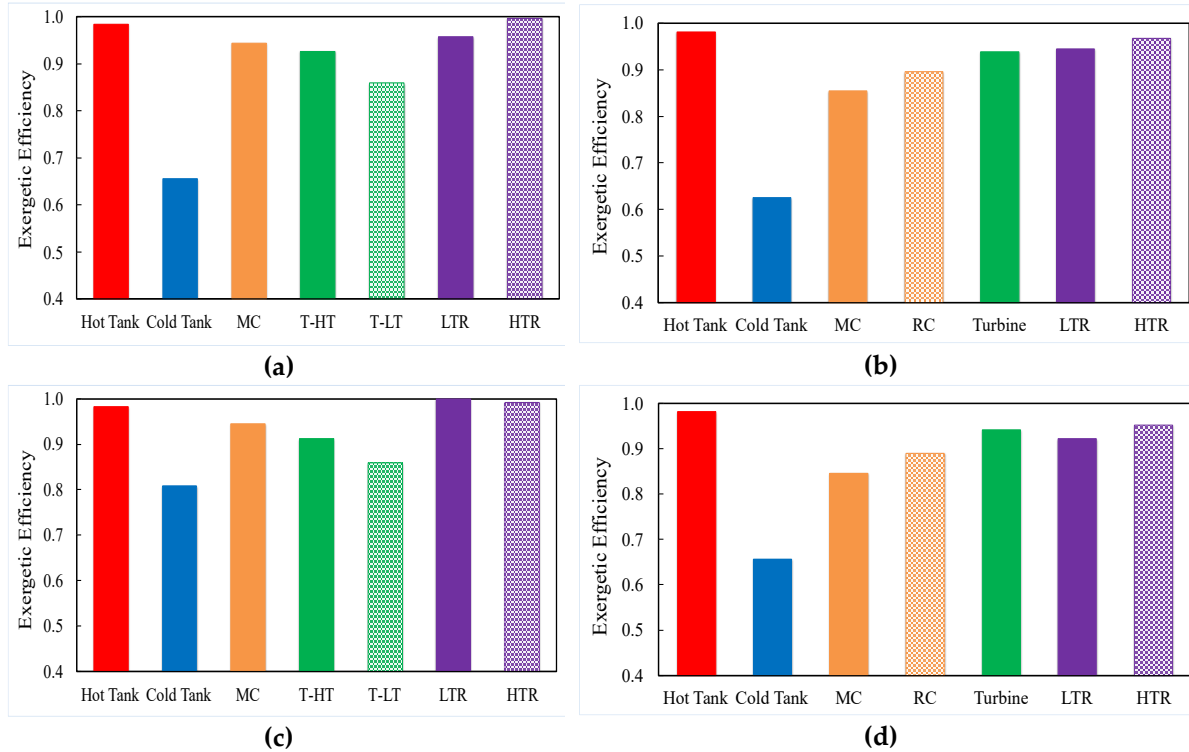
que el tanque frío presenta la mayor irreversibilidad, con valores significativamente inferiores. Los recuperadores de calor (LTR Y HTR) muestran eficiencias térmicas notables y estables, lo que sugiere un rendimiento confiable en la recuperación y transferencia de calor. En el transcurso de la etapa de descarga (Figura 21-b), se evidencia una persistencia en la tendencia observada: los tanques exhiben los niveles más elevados de contracción, mientras que la turbina y los recuperadores evidencian eficiencias que superan el 90%, contribuyendo de manera significativa a la estabilidad del ciclo en cuestión

En contraste al priorizar el objetivo de optimizar la eficiencia round-trip esto nos hace notar una mejora sustancial en la eficiencia exergética de casi todos los componentes especialmente en el tanque frío, donde se evidencia una reducción significativa en la penalización de la exergética en comparación al LCOS mínimo. En el proceso de carga y descarga los recuperadores (LTR Y HTR) alcanzan eficiencias cercanas a la unidad lo que nos hace evidenciar una mayor eficacia en el aprovechamiento de los gradientes térmicos. En el presente estudio se ha observado que la turbina muestra un ligero aumento de la eficiencia en comparación con el caso de LCOS mínimo. Este hecho refleja un mejor aprovechamiento del potencial de trabajo

El propósito de la optimización para minimizar el LCOS es primordialmente la reducción de costes. No obstante, se evidencia una mayor irreversibilidad en ciertos componentes críticos, tales como el tanque frío. Por el contrario, la optimización orientada a la máxima eficiencia round-trip tiene como resultado un uso más equilibrado de la energía entre subsistemas, mejorando la eficiencia global del sistema RBC-PTES, aunque con un impacto potencial en el aumento de los costes de eficiencia.

Figura 21

Eficiencia exergetica. (a) Eficiencia exergetica en el mínimo LCOS y en la fase de carga, (b) Eficiencia exergetica en el mínimo LCOS y en la fase de descarga, (c) Eficiencia exergetica en el máximo de eficiencia Round-trip y en la fase de carga, (d) Eficiencia exergetica en el máximo de eficiencia Round-Trip y en la fase de descarga.



3.8. Análisis comparativo de destrucción de exergía

La Figura 22 presenta un análisis comparativo de la destrucción de exergía distribuida por componente en los modos de carga (Figura 22-a, c) y descarga (Figura 22-b, d) del sistema RBC-PTES, bajo dos criterios de optimización: mínimo LCOS (arriba) y máxima eficiencia round-trip (abajo). Esta comparación permite identificar los componentes clave responsables mayores irreversibilidades.

Durante la etapa de carga (Figura 22-a), el compresor principal (MC) es el elemento que experimenta la mayor pérdida de exergía (39%), seguido del LTR (24%) y la turbina de baja presión (L-LT) (16%), lo que evidencia que la compresión es el principal generador de irreversibilidad y un factor determinante en el LCOS. Estas pérdidas potenciales podrían mitigarse a través de la optimización de la eficiencia isentrópica o mediante la integración de

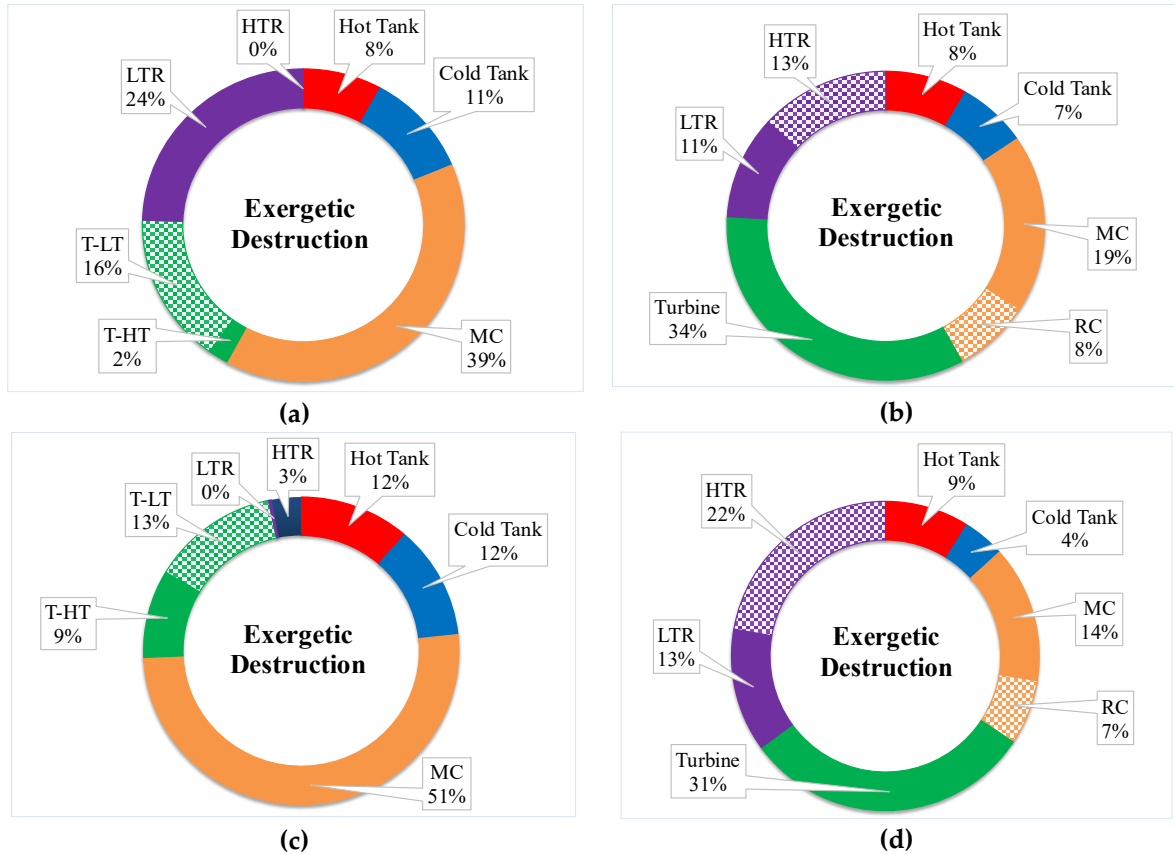
un intercooler. En la etapa de descarga (Figura 22-b), se observan las siguientes contribuciones: la turbina (34%), el HTR (13%) y, nuevamente, el MC (19%). Estos resultados indican que las irreversibilidades térmicas asociadas a gradientes mal aprovechados son considerables. Este hecho subraya la relevancia de una integración térmica optimizada para reducir las pérdidas durante el proceso de recuperación de energía.

Al maximizar la eficiencia round-trip, se observa un cambio considerable en el perfil de destrucción de exergía. En la etapa de carga (Figura 21-c), el MC representa el 51% de las irreversibilidades, lo que refleja el mayor esfuerzo de compresión necesario para mejorar la eficiencia de recuperación. Este fenómeno evidencia un equilibrio entre la eficiencia y las pérdidas internas, de modo que una mayor eficiencia requiere un mayor trabajo específico por unidad de calor almacenado. En fase de descarga (Figura 21-d), se evidencia una redistribución de las pérdidas: el HTR (22%) y el LTR (13%) incrementan su relevancia, mientras que la turbina preserva una porción significativa (31%). Estos resultados sugieren que, en condiciones de alta eficiencia, las pérdidas asociadas a gradientes térmicos y desajustes en los recuperadores se intensifican como consecuencia de una mayor utilización del calor sensible de baja energía.

El análisis realizado evidencia la importancia de una selección meticulosa de los criterios de optimización, dado que los mecanismos de pérdida exhiben variaciones significativas en función del objetivo establecido. También pone de relieve la importancia de aplicar estrategias de mejora específicas a los equipos con mayores tasas de destrucción, como compresores y recuperadores, para lograr mejoras simultáneas en coste y eficiencia.

Figura 22

Destrucción de exergía. (a) Destrucción de exergía en el mínimo LCOS y en la etapa de carga, (b), Destrucción de exergía en el mínimo LCOS y en la etapa de descarga, (c) Destrucción de exergía en la máxima Round-trip y en la etapa de carga (d) Destrucción de exergía en la máxima eficiencia Round-trip y en la etapa de descarga.

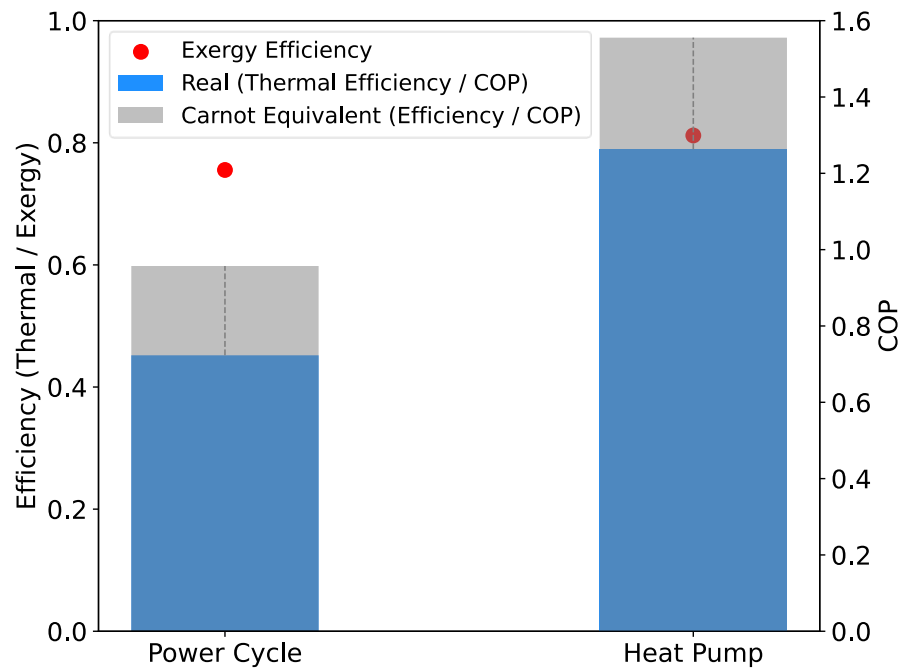


En la Figura 23 se presenta una comparación de los indicadores de rendimiento del sistema, considerando el análisis energético y exergético. Por un lado, cuando el sistema se comporta como un ciclo de potencia (etapa de descarga) la eficiencia térmica es del 45,2%, mientras que la eficiencia equivalente de Carnot es del 59,8%, lo que indica la existencia de pérdidas irreversibles asociadas principalmente a procesos de compresión y expansión no ideales. La eficiencia exergética presenta un valor significativamente superior (75,5%), lo que refleja una mejor representación de la calidad de la energía transformada. Por otro lado, en el caso del sistema que funciona como bomba de calor (etapa de carga), el coeficiente de rendimiento (COP) alcanza 1,26, mientras que su equivalente de Carnot se aproxima a 1,55.

Sin embargo, cuando se analiza desde una perspectiva exergética, el valor obtenido (81,2%) revela que, aunque el sistema exhibe una buena eficiencia energética, las irreversibilidades termodinámicas siguen limitando su aproximación al comportamiento ideal.

Figura 23

Comparación de los indicadores de rendimiento termodinámico y exergético del sistema Recompresión Ciclo Brayton RBC-PTES.



3.9 Comparación de rendimiento del sistema PTES

Como se evidencia en la tabla n 3, el estudio se ha fundamentado en una serie de fuentes, cada una de las cuales ha proporcionado una contribución distinta a la compresión global del tema. En su estudio, (Yang & Du, 2025) formularon la hipótesis de que las eficiencias de las turbobombas utilizadas en este análisis superan las observadas en la investigación realizada. En consecuencia, se evidencia un incremento de la eficiencia round-trip.

Tabla 3
Comparación con el resto de los resultados

Autor	Fluido de trabajo.	Ciclo Brayton	Materiales de almacenamiento	Eficiencia Round-trip [%]	LCOS [\$/MWh]
(McTigue et al., 2022)	N ₂	Recuperativo	Sal fundida / metanol	59 - 66	130 – 230
(Tafur-Escanta et al., 2022a)	s-CO ₂	Recuperativo	Sal Solar/ agua a presión	59.63	137
(Sun et al., 2022)	s-CO ₂	Recompresión	Sal Solar/ Agua	69.38	-
(Albay et al., 2025)	s-CO ₂	Recuperativo	Sal fundida/ Agua	35 - 60	-
(Yang & Du, 2025)	s-CO ₂	Recompresión	Sal Solar / Agua	70.75	108.2
Trabajo actual	s-CO ₂	Recompresión	Sal Solar/ Agua	57.1 - 61.5	148.72 – 158.40

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

En esta presente centra en el análisis tecnoeconómico de un sistema de almacenamiento por bombeo (PTES) que utiliza el ciclo Brayton de recompresión de dióxido de carbono en estado supercrítico (s-CO₂). Se realizó un análisis multiparámetro basado en el algoritmo Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II). En este caso deben tenerse en cuenta las variables críticas, como la fracción másica dirigida al compresor durante el proceso de descarga, así como las condiciones de temperatura y presión de entrada al compresor y la temperatura de entrada a la turbina. La optimización de parámetros de rendimiento tales como la eficiencia round-trip y el Costo Nivelado de Almacenamiento (LCOS), se fundamenta en una comprensión exhaustiva de las variables críticas. Además, el estudio aborda el análisis de la influencia de las irreversibilidades introducidas por los componentes de la topología de ciclo seleccionada.

Los resultados de la optimización multiparamétrica ponen de manifiesto el equilibrio inherente entre rendimiento económico y termodinámico en el sistema (PTES) propuesto (tabla 4). Al minimizar el coste nivelado de almacenamiento (LCOS), el sistema alcanza un coste de 148.72 \$/MWh con una eficiencia round-trip de 57.1% mientras que la configuración que maximiza la eficiencia alcanza el 61.5% a costa de un LCOS más elevado de 158.4 \$/MWh. Es evidente que dichos resultados se ven significativamente influenciados por las variaciones en la presión de entrada al compresor (76-77 bar), la temperatura de entrada a la turbina entre (953.2 - 993.2 K) la fracción másica de carga entre (0.07 – 0.25). Asimismo, se ha comprobado que la fracción másica de descarga óptima es de 0.21.

Los resultados obtenidos evidencian que el funcionamiento optimizado puede proporcionar un compromiso equilibrado entre la rentabilidad y eficiencia, lo que confirma la

viabilidad técnica del ciclo Brayton de recompresión como solución competitiva para el almacenamiento de energía térmica por bombeo de larga duración

Tabla 4
Propiedades de los resultados finales

	Mínimo LCOS	Máxima η_{rt}	Unidades
CIP	76	77	bar
CIT	307.1	306.1	K
TIT	953.2	993.2	K
γ_{chg}	0.07	0.25	-
γ_{dis}	0.21	0.21	-
r_p^{chg}	3.947	3.947	-
r_p^{dis}	3.896	3.947	-
H_{chg}	10	10	h
H_{dis}	10.8	10.2	h
LCOS	148.72	158.40	\$/MWh
η_{rt}	57.1	61.5	%

El análisis realizado ha demostrado que la elección del criterio de optimización influye significativamente en el rendimiento termodinámico y exegético de sistema RBC-PTES. En el caso de que el objetivo se minimizar el coste nivelado, se obtiene una distribución de eficiencias favorables en componentes clave, tales como las recuperadores de calor (HTR Y LTR), que exhiben un comportamiento estable, cercano a la unidad, durante etapas de carga y descarga.

No obstante, la implementación de esta estrategia conlleva un incremento sustancial en costos de energía del acumulador frío particularmente durante la fase de carga, así como una disminución significativa en la eficiencia del compresor principal. Con el análisis precedente un enfoque de optimización centrado en la maximización de la eficiencia round-trip evidencia una mejora generalizada de la eficiencia energética de los componentes, en particular aquellos que constituían puntos críticos de pérdida en el escenario previo como lo es el tanque frío. Los

recuperadores de calor alcanzan eficiencias cercanas al 100%, lo que indica un aprovechamiento más eficaz de los gradientes térmicos. No obstante, este análisis de optimización se ve contrapesada por un incremento en la degradación energética del compresor primario. Además, el análisis de destrucción de exergía de los componentes revela que, si bien la turbina y los recuperadores mantienen un rendimiento excepcional durante la etapa de descarga, los patrones de irreversibilidad se redistribuyen en función del objetivo de optimización. En este contexto, la etapa de compresión adquiere alta relevancia estratégica, puesto que su concepción y operatividad determinan no solo la eficiencia energética, sino también los costes asociados.

5.2 Recomendaciones

Con el propósito de investigaciones subsecuentes es examinar el RBC-PTES empleando mezclas binarias y ternarias de (s-CO₂) como fluidos de trabajo. Además, se debe evaluar el rendimiento dinámico del RBC-PTES para determinar la configuración óptima y el análisis de costes de las turbomáquinas que constituyen este sistema.

REFERENCIAS

- Albay, A., Zhu, Z., & Mercangöz, M. (2025). Optimization-based state-of-charge management strategies for supercritical CO₂ Brayton cycle pumped thermal energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115387>
- Crespi, F., Gavagnin, G., Sánchez, D., & Martínez, G. S. (2017). Supercritical carbon dioxide cycles for power generation: A review. *Applied Energy*, 195, 152–183. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.02.048>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 6(2), 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Dumont, O., Frate, G. F., Pillai, A., Lecompte, S., De paepe, M., & Lemort, V. (2020). Carnot battery technology: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage*, 32, 101756. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101756>
- Elalfy, D. A., Gouda, E., Kotb, M. F., Bureš, V., & Sedhom, B. E. (2024). Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. *Energy Strategy Reviews*, 54, 101482. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2024.101482>
- González-Roubaud, E., Pérez-Osorio, D., & Prieto, C. (2017). Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 133–148. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.084>

- Hao, Y., & Khan, I. (2025a). Impact of decarbonization enablers, energy supply between transition and disruption, on renewable energy development. *Energy*, 324, 135863. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2025.135863>
- Hao, Y., & Khan, I. (2025b). Impact of decarbonization enablers, energy supply between transition and disruption, on renewable energy development. *Energy*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135863>
- Held, T., Miller, J., Mallinak, J., Avadhanula, V., & Magyar, L. (2024). *Pilot-Scale Testing of a Transcritical CO₂-Based Pumped Thermal Energy Storage (PTES) System*. <https://doi.org/10.1115/GT2024-129211>
- Lemmon, E., Huber, M., & McLinden, M. (2013). *NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 9.1*. Natl Std. Ref. Data Series (NIST NSRDS), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=912382
- Ma, Y. N., Hu, P., Jia, C. Q., Wu, Z. R., & Chen, Q. (2023). Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of supercritical Brayton cycles with CO₂-based mixtures. *Applied Thermal Engineering*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119492>
- McTigue, J. D., Farres-Antunez, P., J. K. S., Markides, C. N., & White, A. J. (2022). Techno-economic analysis of recuperated Joule-Brayton pumped thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115016>

- McTigue, J., & Ma, Z. (2025). Analysis of pumped thermal energy storage using particle media integrated with concentrating solar power. *Solar Energy*, 292, 113436. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2025.113436>
- Michael, P., Escanta, T., & Antón, J. M. (2020). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CICLOS DE POTENCIA BRAYTON s-CO₂ CON CSP Y ALMACENAMIENTO TÉRMICO* Paúl Michael Tafur Escanta *Diseño y Simulación de Ciclos de Potencia Brayton s-CO₂ con CSP Y Almacenamiento Térmico*.
- Parisi, S., Desai, N. B., & Haglind, F. (2024). Techno-Economic Analysis of Using Reversible Turbomachinery for Pumped Thermal Energy Storage Systems. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 146(5). <https://doi.org/10.1115/1.4065041>
- Paul Tafur, Robert Valencia, Miguel López Miguel, Olmo Fierros-Peraza, & Javier Muñoz-Antón. (2022). Electrical energy storage using a supercritical CO₂ heat pump. *Energy Reports*, 8, 502–507. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.01.073>
- Prieto, C., Tagle-Salazar, P. D., Patiño, D., Schallenberg-Rodriguez, J., Lyons, P., & Cabeza, L. F. (2024). Use of molten salts tanks for seasonal thermal energy storage for high penetration of renewable energies in the grid. *Journal of Energy Storage*, 86, 111203. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2024.111203>
- Rekioua, D. (2023). Energy Storage Systems for Photovoltaic and Wind Systems: A Review. In *Energies* (Vol. 16, Issue 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16093893>
- Sharma, R., Kumar, H., Kumar, G., Sharma, S., Aneja, R., Sharma, A. K., Kumar, R., & Kumar, P. (2023). Progress and challenges in electrochemical energy storage devices:

- Fabrication, electrode material, and economic aspects. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 468). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143706>
- Smallbone, A., Jülch, V., Wardle, R., & Roskilly, A. P. (2017). Levelised Cost of Storage for Pumped Heat Energy Storage in comparison with Other Energy Storage Technologies. *Energy Conversion and Management*, 152, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.047>
- Song, J., Wang, Y., Wang, J., & Markides, C. N. (2021). Optimal design of supercritical CO₂ (s-CO₂) cycle systems for internal combustion engine (ICE) waste-heat recovery considering heat source fluctuations. *Conference Proceedings of the European SCO₂ Conference*, 205–211. <https://doi.org/10.17185/dupublico/73964>
- Sun, R., Zhao, Y., Liu, M., & Yan, J. (2022). Thermodynamic design and optimization of pumped thermal electricity storage systems using supercritical carbon dioxide as the working fluid. *Energy Conversion and Management*, 271, 116322. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116322>
- Tafur Paúl. (2020). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CICLOS DE POTENCIA BRAYTON s-CO₂ CON CSP Y ALMACENAMIENTO TÉRMICO* Paúl Michael Tafur Escanta Diseño y Simulación de Ciclos de Potencia Brayton s-CO₂ con CSP Y Almacenamiento Térmico. https://oa.upm.es/65835/?utm_source
- Tafur Paul. (2024). *Análisis y Optimización del Rendimiento de Ciclos Brayton Cerrados Avanzados con Mezclas de CO₂. Tesis (Doctoral).*
- Tafur Paúl. (2024). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA Análisis y Optimización del Rendimiento de Ciclos Brayton Cerrados Presentada para optar al título de Doctor por.*

- Tafur-Escanta, P., Valencia-Chapi, R., López-Guillem, M., Fierros-Peraza, O., & Muñoz-Antón, J. (2021). Electrical Energy Storage Using a Supercritical CO₂ Heat Pump. *ICEER-2021 - The 8th International Conference on Energy and Environment Research*, 133–134. <https://www.jianguoyun.com/p/DVoJ54gQgIfoCRi6440E>
- Tafur-Escanta, P., Valencia-Chapi, R., López-Guillem, M., Fierros-Peraza, O., & Muñoz-Antón, J. (2022). Electrical energy storage using a supercritical CO₂ heat pump. *Energy Reports*, 8, 502–507. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.073>
- Tafur-Escanta, P., Valencia-Chapi, R., López-Paniagua, I., Coco-Enríquez, L., & Muñoz-Antón, J. (2021). Supercritical CO₂ binary mixtures for recompression brayton s-CO₂ power cycles coupled to solar thermal energy plants. *Energies*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/en14134050>
- Thada, S., Pradeep, A. M., & Sridharan, A. (2021). Preliminary aerodynamic design of a supercritical carbon dioxide Compressor Impeller for Waste Heat Recovery Applications. *Conference Proceedings of the European SCO₂ Conference*, 154–163. <https://doi.org/10.17185/dupublico/73958>
- Trevisan, S., Guédez, R., & Laumert, B. (2020). Thermo-economic optimization of an air driven supercritical CO₂ Brayton power cycle for concentrating solar power plant with packed bed thermal energy storage. *Solar Energy*, 211, 1373–1391. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2020.10.069>
- U.S Department of energy. (2016). *QTR2015-4R-Supercritical-Carbon-Dioxide-Brayton Cycle*.
- Valencia Chapi. (2022). *Evaluación y análisis de ciclos Brayton con mezclas de s-CO₂ en plantas de energía solar concentrada*. <https://doi.org/10.20868/UPM.THESIS.69950>

- Valencia-Chapi, R., Coco-Enríquez, L., & Muñoz-Antón, J. (2020). Supercritical CO₂ Mixtures for Advanced Brayton Power Cycles in Line-Focusing Solar Power Plants. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/app10010055>
- Valencia-Chapi, R., Tafur-Escanta, P., Enríquez, L., & Muñoz-Antón, J. (2022). Supercritical CO₂ mixtures for Brayton power cycles complex configurations with concentrating solar power. *AIP Conference Proceedings*, 2445, 90009. <https://doi.org/10.1063/5.0086032>
- Wang, K., Li, M. J., Guo, J. Q., Li, P., & Liu, Z. Bin. (2018). A systematic comparison of different S-CO₂ Brayton cycle layouts based on multi-objective optimization for applications in solar power tower plants. *Applied Energy*, 212, 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.031>
- Yang, H., & Du, X. (2025). Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of pumped thermal electricity storage system with S-CO₂ recompression Brayton cycle. *Journal of Energy Storage*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116821>