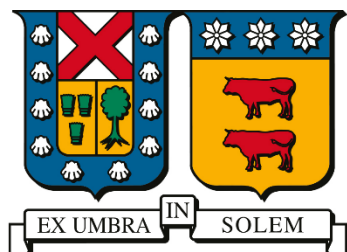


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA
MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AMBIENTAL**

VALPARAÍSO - CHILE



**MODELADO DE LA EFICIENCIA
TERMODINÁMICA DE UN CICLO DE
BRAYTON ABIERTO ACOPLADO CON UN
SISTEMA DE CAPTURA DE DIÓXIDO DE
CARBONO SUPERCRÍTICO**

DIEGO ANDRÉS ARMIJO GONZÁLEZ

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
QUÍMICO**

PROFESOR GUÍA

Dr. JUAN C. DE LA FUENTE

COREFERENTES

Dr. GONZALO A. NÚÑEZ

MSc. ADOLFO L. CABRERA

Ing. EDUARDA A. VILLAR

julio de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Modelado de la eficiencia termodinámica de un Ciclo de Brayton abierto acoplado con un sistema de captura de dióxido de carbono supercrítico

Nombre del candidato(a): Diego Andrés Armijo González

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Química

Campus: Casa Central **Departamento:** Ingeniería Química y Ambiental

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Juan C. de la Fuente, en mi calidad de profesor(a)
guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 21 Julio 2026

Firma: Juan C. de la Fuente

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21/07/2026

Firma: Diego A. Armijo

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera expresar mi profundo agradecimiento a mis profesores correferentes: al profesor Juan de la Fuente por su guía y empatía en este proceso académico; al profesor Adolfo Cabrera por su visión crítica y perspectiva técnica en el desarrollo de la memoria; a la ingeniera Eduarda Villar por su cercanía y sabiduría para enfrentar este hito con una buena estrategia.

También quiero agradecer a mi grupo de amigos. En los momentos más difíciles siempre pude contar con ellos, su apoyo en cada parte del proceso me mantuvo firme y constante en mis objetivos. A Ignacia, por ser una compañera increíble, por incluirme en su vida a pesar de la distancia y los momentos difíciles, por entregarme su apoyo y cariño incondicional.

A mis hermanos por tener ese vínculo inquebrantable. A mi hermano Felipe por enseñarme a ser disciplinado y siempre tener una visión objetiva para tomar las mejores decisiones. A mi hermano Matías, por acompañarme y aconsejarme a lo largo de todos los años académicos en Valparaíso.

Por último y más importante quiero dar las gracias a mi madre y a mi padre. A mi madre, Silvia, por enseñarme a ser empático, amable y por mostrarme que la sencillez es un reflejo de claridad interior. A mi padre, Manuel, por mostrarme la importancia de ser ordenado, dedicado y metódico, y por enseñarme que la perseverancia es el camino silencioso hacia el éxito.

Sin duda este logro no sería posible sin el apoyo de todos.

Resumen

El presente estudio determina el efecto de la temperatura, presión y composición de cada corriente en la eficiencia termodinámica de un ciclo de Brayton abierto acoplado con un sistema de captura de dióxido de carbono supercrítico (SC-CO₂). Para ello, se desarrolla un simulador termodinámico propio asistido por inteligencia artificial (IA), aplicando la relación de energía libre de Helmholtz y la ecuación de Peng-Robinson con la regla de mezclado de Van der Waals. A través de las simulaciones, la optimización termodinámica establece que la temperatura de combustión es una limitante operativa crítica, fijando su máximo en 2000°C por restricciones de materiales en los equipos de combustión. Asimismo, el análisis de sensibilidad evidencia que la eficiencia global del ciclo disminuye progresivamente al aumentar la fracción de agua en la turbina. Para garantizar un funcionamiento estable, se concluye que la fracción de agua no debe exceder un valor de 0,12[-], condición que exige mantener una fracción de recirculación de dióxido de carbono supercrítico superior a 0,9[-].

El análisis comparativo revela que un ciclo cerrado de recompresión de referencia exhibe una eficiencia térmica global levemente superior (44,40[%]) respecto al ciclo abierto a baja presión (40,23[%]). No obstante, el ciclo abierto compensa esta diferencia al requerir aproximadamente un tercio de la cantidad de combustible que el ciclo cerrado para generar la misma potencia neta de 10[MW]. Desde una perspectiva económica, para una instalación de 10[MW], el ciclo abierto demanda una inversión en equipos mayor, ascendiendo a 45[mUSD] frente a los 27,7[mUSD] del ciclo cerrado, debido a la inclusión de una Unidad de Separación de Aire (ASU) y requerimientos térmicos especiales en la turbina. Sin embargo, el acoplamiento del ciclo abierto a yacimientos agotados de petróleo con el objetivo de generar una Recuperación Mejorada de Petróleo (EOR), otorga una rentabilidad superior a largo plazo mediante la revalorización de los productos de la combustión.

La metodología aplicada permite comparar el desempeño del simulador construido frente al software comercial Aspen HYSYS. A partir de esto, se comprueba que no es justificable el costo de una licencia comercial cuando existen alternativas de código abierto. El estudio demuestra que la integración de asistentes de inteligencia artificial para la estructura del código permite crear una plataforma personalizada sin la necesidad de tener conocimientos avanzados de programación. De esta forma, queda en evidencia que poseer una idea correctamente estructurada del proceso termodinámico y utilizar la IA como recurso de apoyo, es suficiente para construir una herramienta robusta que cumpla con los objetivos del análisis.

Abstract

The present study determines the effect of temperature, pressure, and the composition of each stream on the thermodynamic efficiency of an open Brayton cycle coupled with a supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) capture system. For this purpose, an in-house thermodynamic simulator assisted by artificial intelligence (AI) is developed, applying the Helmholtz free energy relationship and the Peng-Robinson equation of state with the Van der Waals mixing rule. Through simulations, the thermodynamic optimization establishes that the combustion temperature is a critical operational constraint, setting its maximum at 2000[°C] due to material limitations in the combustion equipment. Likewise, the sensitivity analysis shows that the overall efficiency of the cycle progressively decreases as the water fraction in the turbine increases. To ensure optimal operation, it is concluded that the water fraction must not exceed a value of 0,12[-], a condition that requires maintaining a supercritical carbon dioxide recirculation fraction greater than 0,9[-].

The comparative analysis reveals that a reference recompression closed cycle exhibits a slightly higher overall thermal efficiency (44,40[%]) compared to the low-pressure open cycle (40,23[%]). However, the open cycle compensates for this difference by requiring approximately one-third of the amount of fuel compared to the closed cycle to generate the same net power of 10[MW]. From an economic perspective, for a 10[MW] installation, the open cycle demands a higher equipment investment, amounting to 45[mUSD] compared to 27,7[mUSD] for the closed cycle, due to the inclusion of an Air Separation Unit (ASU) and special thermal requirements for the turbine. Nevertheless, coupling the open cycle to depleted oil fields for Enhanced Oil Recovery (EOR) provides superior long-term profitability through the revalorization of the combustion products.

The applied methodology allows comparing the performance of the developed simulator against the commercial software Aspen HYSYS. From this, it is proven that the cost of a commercial license is not justifiable when open-source alternatives exist. The study demonstrates that integrating artificial intelligence assistants for code structuring allows creating a customized platform without the need for advanced programming knowledge. Thus, it becomes evident that having a correctly structured idea of the thermodynamic process and using AI as a support resource is sufficient to build a robust tool that meets the objectives of the analysis.

Glosario

ASU:	Unidad de Separación de Aire.
BC:	Compresor Bypass.
CCS:	Captura y Almacenamiento de Carbono.
DE:	Evolución Diferencial.
EOR:	Recuperación Mejorada de Petróleo.
HTR:	Recuperador de Alta Temperatura.
IA:	Inteligencia Artificial.
IPCC:	Panel Intergubernamental del Cambio Climático.
IST:	Tanque de Almacenamiento de Inventario.
LCOE:	Costo Nivelado de la Energía.
LHV:	Poder Calorífico Inferior.
LTR:	Recuperador de Baja Temperatura.
MC:	Compresor Principal.
NIST:	Instituto Nacional de Estándares y Tecnología.
PCHE:	Enfriador de Circuitos Impresos.
PHX:	Intercambiador de Calor Primario.
PR:	Ecuación de Peng-Robinson.
SC-CO ₂	Dióxido de Carbono Supercrítico.
TRB:	Turbina.
TRL:	Nivel de Madurez Tecnológica
VdW	Van der Waals.

Índice de contenidos

Agradecimientos	1
Resumen	2
Abstract.....	3
Glosario	4
1. Introducción.....	9
2. Objetivos.....	10
2.1. Objetivo general	10
2.2. Objetivos específicos.....	10
3. Estado del arte	10
3.1. Comparación entre ciclo cerrado y ciclo abierto	10
3.2. Estudios sobre la eficiencia en función de la fracción de agua	13
3.3. Integración con sistemas de captura de CO ₂ (CCS)	14
3.4. Avances recientes en el ciclo de Brayton con SC-CO ₂	15
3.5. Oportunidades y brechas de investigación	15
4. Metodología.....	16
4.1. Enfoque general.....	16
4.2. Selección de configuración de ciclo de Brayton abierto	16
4.3. Modelación del ciclo	17
4.4. Definición de parámetros.....	19
4.5. Implementación de simulador con IA	20
4.6. Selección de la tecnología de captura y almacenamiento de CO ₂	27
4.7. Análisis comparativo de configuraciones del ciclo	28
4.8. Comparación con simuladores comerciales	28
5. Desarrollo	29
5.1. Diseño de herramienta de simulación y algoritmos de cálculo	29
5.1.1. Simulación Base y Optimización	30
5.1.2. Simulación de Sensibilidad fracción de agua y fracción de recirculación ...	31
5.2. Selección de sistema de almacenamiento de SC-CO ₂	31
5.3. Selección de ciclo cerrado de referencia	33
6. Análisis y discusión de resultados	36

6.1.	Resultados y análisis de simulación	36
6.2.	Comparación de ciclo abierto vs ciclo cerrado.....	40
6.2.1.	Eficiencia Termodinámica.....	40
6.2.2.	Consumo Energético.....	41
6.2.3.	Costos y viabilidad técnica.....	43
6.3.	Comparación de simulador vs Aspen HYSYS	47
6.3.1.	Configuración y flexibilidad.....	47
6.3.2.	Precisión y Robustez de cálculo	47
6.3.3.	Tiempo de aprendizaje y desarrollo.....	48
6.3.4.	Costo y accesibilidad.....	49
7.	Conclusión.....	51
8.	Referencias	52
9.	Anexos.....	57

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de flujo de proceso de ciclo de Brayton cerrado	11
Figura 2: Diagrama de flujo de proceso de ciclo de Brayton abierto	12
Figura 3: Diagrama de flujo de proceso de ciclo de Brayton semi cerrado.....	12
Figura 4: Configuración ciclo de Brayton abierto con oxidcombustión	17
Figura 5: Diagrama de flujo de simulación	22
Figura 6: Diagrama de flujo de análisis de sensibilidad.....	24
Figura 7: Diagrama de flujo de optimización.....	26
Figura 8: Diagrama de ciclo cerrado de recompresión (Liese et al., 2020).....	34
Figura 9: Gráfico comparativo eficiencia global de Etanol, Gas Natural, Gas de Síntesis y Propano	37
Figura 10: (a) Gráfico sensibilidad H_2O simulación de Etanol, (b) gráfico sensibilidad H_2O simulación de Gas Natural, (c) gráfico sensibilidad H_2O simulación de Gas de Síntesis, (d) gráfico sensibilidad H_2O simulación de Propano.	38
Figura 11: Gráfico sensibilidad H_2O simulación de Propano + temperatura de combustión.....	40
Figura 12: Gráfico comparativo eficiencias ciclo cerrado y ciclo abierto a presión alta y baja	41
Figura 13: (a) Gráfico de potencia ciclo cerrado de referencia, (b) Gráfico de potencia ciclo abierto a presión alta, (c) Gráfico de potencia ciclo abierto a presión baja.....	42
Figura 14: Comparativa de costos de equipos principales de ciclo cerrado y abierto de 10[MW]	46
Figura 15: Acceso a simulador de ciclo de Brayton abierto (oxidcombustión)	60

Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros para Peng Robinson y regla de mezclado de Van der Waals	20
Tabla 2: Parámetros de entrada de simulador	21
Tabla 3: Costos estimados de almacenamiento de CO ₂ para diferentes estrategias.	32
Tabla 4: Condiciones nominales de operación de ciclo cerrado de recompresión.	35
Tabla 5: Parámetros de entrada simulación comparativa	36
Tabla 6: Parámetros optimizados en simulación	36
Tabla 7: Estimación costos de equipos para ciclo cerrado de recompresión.....	44
Tabla 8: Estimación costos de equipos para ciclo abierto de oxidación a presión baja	45
Tabla 9: Incertidumbre reportada para Peng-Robinson y energía libre de Helmholtz	48
Tabla 10: Licencias y costos de Software/IA de simulación	49
Tabla 11: Propiedades críticas de dióxido de carbono.....	57
Tabla 12: Propiedades críticas del agua.....	57
Tabla 13: Propiedades críticas del metano	57
Tabla 14: Propiedades críticas del oxígeno	58
Tabla 15: Propiedades críticas del monóxido de carbono	58
Tabla 16: Propiedades críticas del hidrógeno	58
Tabla 17: Propiedades críticas del etano.....	59
Tabla 18: Propiedades críticas del propano	59
Tabla 19: Propiedades críticas del etanol	59
Tabla 20: Poder calorífico inferior (LHV) de combustibles.....	59

1. Introducción

Más del 75% de la energía mundial producida depende de combustibles fósiles (Energy Statistics Data Browser & International Energy Agency, 2025). Grandes rubros como la generación eléctrica, la refinación de petróleo o la industria del acero mantienen una fuerte dependencia de estos recursos. Debido a la producción de gases de efecto invernadero en los procesos de combustión, se han impulsado estrategias tecnológicas orientadas a revalorizar y aprovechar la energía contenida en estos. En este contexto, los ciclos termodinámicos constituyen una alternativa relevante gracias a la reutilización de la energía liberada en gases de combustión. De estos, uno de los más utilizados es el ciclo de Brayton basado en procesos de compresión y expansión para generar energía y que utiliza dióxido de carbono (CO_2). Una de las ventajas del CO_2 es su uso en estado supercrítico, es decir, a temperatura y presión por sobre el punto crítico. Esta condición termodinámica (donde las fases líquida y gaseosa coexisten indistintamente) permite mantener una mayor densidad para lograr la misma potencia con un menor caudal volumétrico, además de presentar una baja viscosidad que reduce significativamente las pérdidas por fricción. En cuanto al ciclo de Brayton, este posee dos configuraciones principales: la cerrada, que emplea un fluido de trabajo como el dióxido de carbono puro en un circuito cerrado, y la abierta, que utiliza comúnmente oxígeno puro en un proceso de oxidación, cuyo producto (mezcla de dióxido de carbono y agua (H_2O)) produce energía en la turbina y posteriormente es liberado a la atmósfera (Zhu, 2017).

A pesar de los avances en la aplicación de CO_2 supercrítico en este proceso, la mayoría de los estudios se ha centrado en configuraciones cerradas, debido a su mayor eficiencia y a que evitan la liberación directa de CO_2 al ambiente (Weiss & Bouallou, 2024). Sin embargo, al incluir una estrategia de captura y almacenamiento de CO_2 (CCS), la configuración abierta se convierte en una alternativa prometedora ya que aborda la problemática ambiental logrando un uso y captura continuo del CO_2 proveniente de la combustión a diferencia del ciclo cerrado, lo que permite mejorar la eficiencia termodinámica. La falta de estudios comparativos entre configuraciones del ciclo presenta un vacío en la literatura ya que, incorporar un sistema de captura no solo permitiría mitigar el impacto ambiental, sino que también podría mejorar el desempeño termodinámico al reutilizar el CO_2 proveniente de la combustión.

Mediante el estudio de la eficiencia termodinámica de un ciclo de Brayton abierto se plantea determinar el efecto que tiene la temperatura, presión y composición de cada corriente del proceso. A partir de esta evaluación, se busca establecer una relación entre la fracción de H_2O en las corrientes del proceso y la generación y consumo de energía en la turbina y el compresor. Para el estudio se propone construir un simulador basado en Python a través de inteligencia artificial (IA) que permita calcular las propiedades termodinámicas (presión, temperatura, entalpía, entropía) mediante la aplicación de reglas de mezclado y de ecuaciones de estado robustas.

Además, un análisis comparativo de las distintas estrategias de captura de CO₂ supercrítico, permite seleccionar una alternativa apropiada desde una perspectiva de reducción de emisiones, eficiencia energética y viabilidad económica del proceso. Finalmente, la relación costo beneficio estimada de un ciclo de Brayton abierto con el sistema acoplado de captura de CO₂ posibilita un análisis comparativo con la relación costo beneficio de un ciclo de Brayton en una configuración cerrada.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- Identificar el efecto de la temperatura, presión y composición de cada corriente del proceso en la eficiencia de un ciclo de Brayton abierto acoplado con un sistema de captura de dióxido de carbono supercrítico.

2.2. Objetivos específicos

- Modelar el equilibrio líquido-vapor de sistemas de CO₂ + H₂O.
- Evaluar el efecto de la fracción de agua del ciclo en la eficiencia termodinámica.
- Desarrollar un simulador del ciclo de Brayton con ayuda de IA que permita el análisis de la temperatura, presión y composición de cada corriente del proceso en la eficiencia del ciclo.
- Seleccionar una alternativa apropiada para el sistema de captura y almacenamiento de dióxido de carbono supercrítico orientada a la reducción de costos del proceso.
- Contrastar la relación costo beneficio entre un ciclo de Brayton abierto operado con mezclas de SC-CO₂ + H₂O con un ciclo de Brayton cerrado que utiliza SC-CO₂ puro.
- Comparar el uso de IA con simuladores comerciales desde una vista técnica y económica para el modelado de un ciclo de Brayton.

3. Estado del arte

En los últimos 10 años, el ciclo Brayton que utiliza dióxido de carbono supercrítico (SC-CO₂) ha despertado un interés creciente en la comunidad científica e industrial (Ahn et al., 2015) debido a su potencial para alcanzar mayores eficiencias térmicas y menores emisiones de carbono en comparación con los ciclos termodinámicos tradicionales. Su investigación y su desarrollo se aborda desde distintas perspectivas: la comparación entre configuraciones cerradas y abiertas, el impacto termodinámico del contenido de agua en el fluido de trabajo, la integración con sistemas de captura de carbono (CCS) y los avances recientes respecto al desafío tecnológico asociado a su implementación a escala industrial.

3.1. Comparación entre ciclo cerrado y ciclo abierto

La literatura distingue dos grandes familias de propuestas con SC-CO₂: ciclos cerrados y ciclos abiertos/semicerrados. En los cerrados (Figura 1), el fluido de trabajo es CO₂ puro sin

mezclarse con productos de combustión, el cual se comprime, se calienta y finalmente se expande en una turbina. Por otro lado, en los abiertos o semicerrados (Figura 2 y Figura 3) la combustión (frecuentemente en presencia de O_2 puro) genera una corriente de trabajo compuesta por CO_2 y vapor de agua, que entra a la turbina para generar energía. En el caso de la configuración abierta, la corriente resultante es liberada a la atmósfera y en el caso de la configuración semicerrada, se elimina el contenido de agua para posteriormente ser recirculada hacia la cámara de combustión (Rogalev et al., 2022; Weiss & Bouallou, 2024).

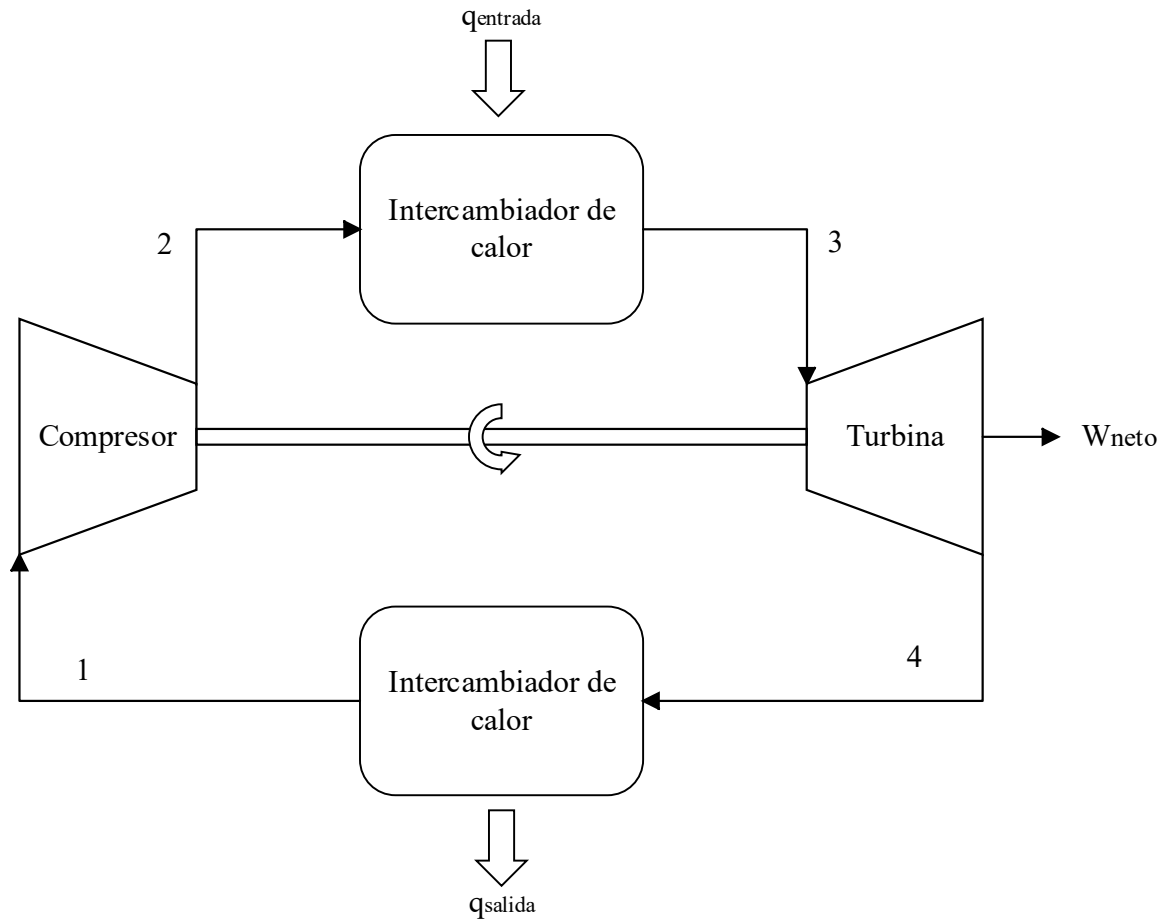


Figura 1: Diagrama de flujo de proceso de ciclo de Brayton cerrado

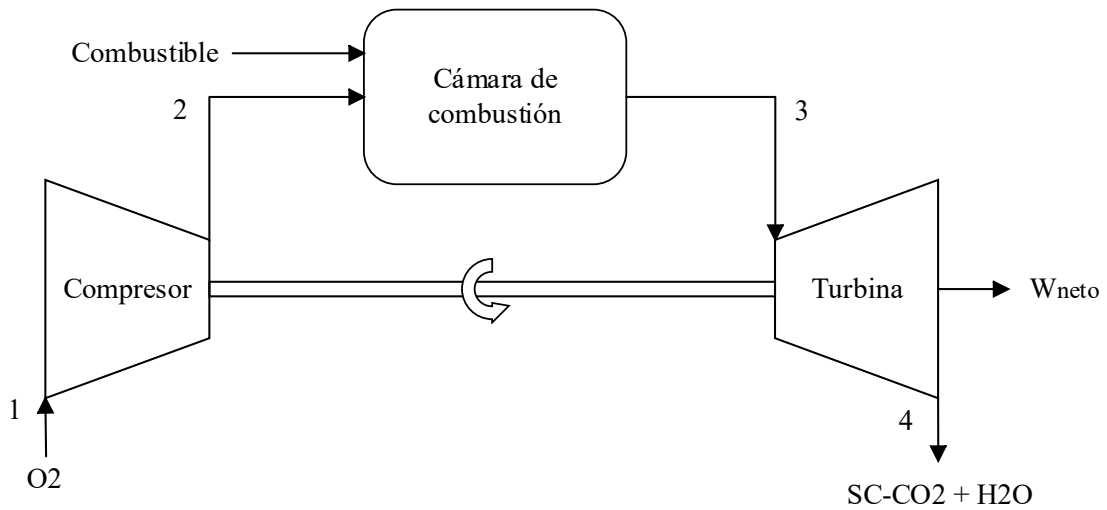


Figura 2: Diagrama de flujo de proceso de ciclo de Brayton abierto

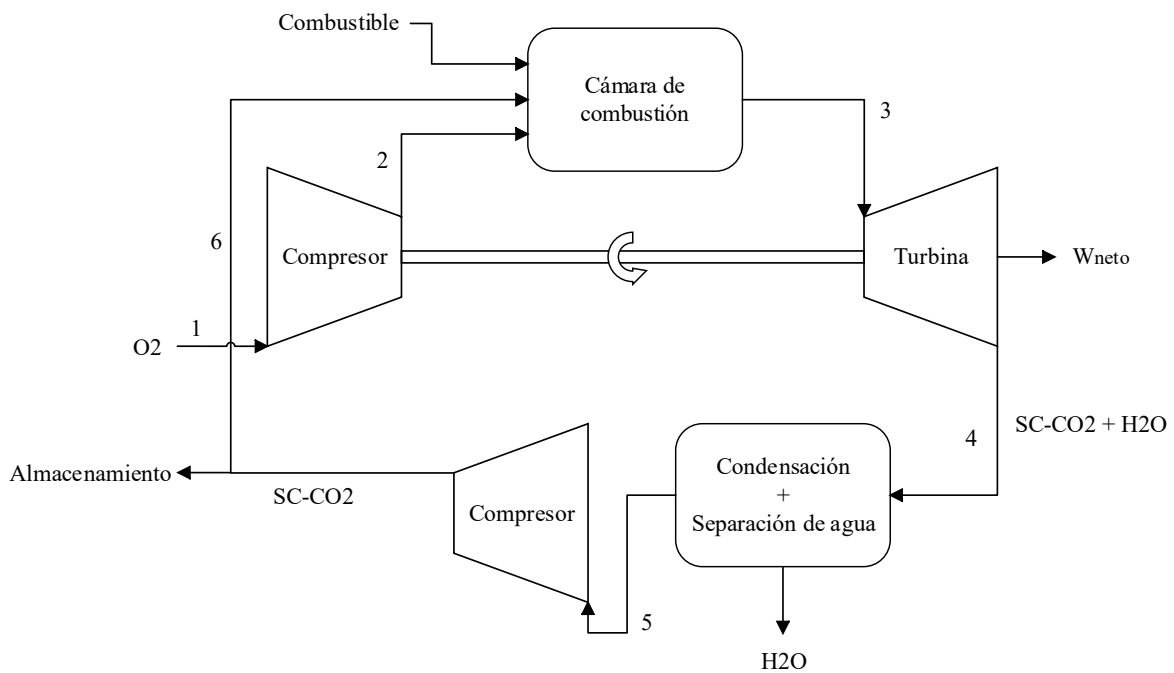


Figura 3: Diagrama de flujo de proceso de ciclo de Brayton semi cerrado

Los ciclos cerrados han mostrado ventaja en eficiencia térmica y control preciso de las condiciones termodinámicas del fluido de trabajo ya que al trabajar con CO_2 puro es posible diseñar recuperadores optimizados y estrategias (recompresión o interenfriamiento) que maximizan la recuperación de calor y reducen el trabajo de compresión en conjunto (Li et al., 2021; Miao et al., 2025). No obstante, la necesidad de una fuente de calor externa y las

etapas de calentamiento del fluido implican sistemas auxiliares complejos que pueden elevar la inversión y reducir la flexibilidad operativa.

En contraste, los ciclos abiertos o semicerrados con combustión de oxígeno producen directamente CO_2 y H_2O en condiciones que, mediante separación, permiten tanto la expansión en una turbina como la captura de CO_2 . Esta configuración simplifica el precalentamiento del fluido de trabajo y facilita la integración con CCS, lo que la hace atractiva para casos donde la captura de carbono es obligatoria o deseable como señala Rogalev et al. (2022). El principal obstáculo es la complejidad en el manejo de mezclas de CO_2 y H_2O . A esto se suman las posibles pérdidas de eficiencia neta derivadas de la presencia de vapor de agua, así como la penalización energética asociada a su separación y a la posterior compresión del dióxido de carbono.

El estudio de Rogalev et al. (2022) menciona que, bajo condiciones ideales y optimizadas, los ciclos cerrados pueden obtener mayores eficiencias netas por unidad de energía térmica suministrada, mientras que los ciclos abiertos destacan por su simplicidad operativa, mayor compatibilidad con combustibles fósiles y facilidad de acoplamiento a CCS, además, destaca que la elección entre uno u otro depende del caso de uso, los cerrados se emplean principalmente en sistemas de alta temperatura y operación continua como en reactores nucleares o plantas solares de concentración (Tamilarasan et al., 2024; White et al., 2021), mientras que los abiertos, especialmente los basados en oxidación, son más apropiados para plantas térmicas alimentadas con gas natural, carbón o biogás en donde la combustión directa con oxígeno genera una mezcla de CO_2 y H_2O que es más simple de separar para almacenar el CO_2 (Sadkin & Shchinnikov, 2025; Weiss & Bouallou, 2024).

3.2. Estudios sobre la eficiencia en función de la fracción de agua

Un aspecto crítico en los ciclos abiertos es el efecto de la fracción de vapor de agua en la corriente que ingresa a la turbina, sobre las propiedades termodinámicas y, por tanto, sobre la eficiencia del ciclo.

Li et al. (2021) en su estudio mediante simulaciones a través de Aspen Plus, establece que variaciones de fracción de H_2O en la corriente de trabajo se traducen en cambios no despreciables de la eficiencia térmica ya que puede reducir la energía disponible para expansión y aumentar la demanda de trabajo en los compresores, con impactos que se acercan al orden de magnitud de 5-10[%] en eficiencia global.

De forma análoga, la investigación por parte de Sadkin & Shchinnikov (2025) aborda específicamente la renovación del fluido de trabajo en ciclos semicerrados con oxidocombustible y concluyen que tasas de renovación del orden de 3% a 6% afectan de forma directa a indicadores termodinámicos y de consumo auxiliar, ya que alteran los balances de masa y energía en el sistema regenerativo. El análisis resalta que la fracción de renovación y, por consiguiente, la fracción de H_2O remanente, debe considerarse como factor independiente de optimización.

Miao et al. (2025) documenta que la integración de un ciclo SC-CO₂ con procesos de gasificación y recuperación de calor puede verse limitada por la temperatura admisible en intercambiadores; en este caso, recuperar el calor del gas de síntesis contribuye a la eficiencia global, pero la presencia de vapor y composición variable del flujo obliga a incluir un análisis de sensibilidad, parámetros como la eficiencia isoentrópica de turbina y compresor son determinantes para amortiguar el efecto negativo de H₂O en la corriente.

En conjunto, la evidencia indica que controlar y minimizar la fracción de H₂O que llega a las etapas críticas (turbina, recuperadores) es esencial para preservar la eficiencia. Esto se debe a que la presencia de vapor de agua en la mezcla altera las propiedades del fluido de trabajo, aumentando el calor específico y reduciendo la densidad y capacidad expansiva del CO₂ supercrítico. Consecuentemente, este fenómeno se traduce en una menor diferencia de entalpía durante la expansión y, por tanto, una disminución del trabajo neto disponible (Li et al., 2021; Miao et al., 2025).

3.3. Integración con sistemas de captura de CO₂ (CCS)

La integración de ciclos SC-CO₂ abiertos con tecnologías de captura de CO₂ es, en la práctica, el principal argumento a favor de esta configuración cuando el objetivo es producir electricidad con bajas emisiones. Existen 4 factores claves mencionados en investigaciones recientes:

1. Facilidad relativa de separación: la combustión en presencia de O₂ puro (oxicomustión) produce esencialmente CO₂ y H₂O, reduciendo la presencia de nitrógeno (N₂) y simplificando la separación física y la obtención de CO₂ de alta pureza, comparado con gases de combustión en aire. Esto facilita las etapas de compresión y empaado para almacenamiento o uso industrial (Rogalev et al., 2022; Weiss & Bouallou, 2024).
2. Impacto energético y económico: incorporar CCS añade consumo energético propio (compresión, tratamiento, energía auxiliar) e inversión adicional; sin embargo, algunos estudios (Rogalev et al., 2022; Tamilarasan et al., 2024; Weiss & Bouallou, 2024) muestran que, en configuración abierta/semicerrada, la reducción del gasto energético en precalentamiento y la posibilidad de captura eficiente pueden compensar en términos del costo nivelado de la energía (LCOE) y perfil de emisiones frente a alternativas convencionales.
3. Opciones de uso y almacenamiento: el CO₂ capturado puede destinarse a almacenamiento geológico o aplicaciones industriales, lo que abre cadenas de valor adicionales y puede mejorar la viabilidad económica global del sistema (Tamilarasan et al., 2024).
4. Diseño integrado: investigaciones recientes proponen arquitecturas donde se optimiza simultáneamente el diseño del ciclo SC-CO₂, el separador de fases y la unidad de compresión/almacenamiento de CO₂ para minimizar el consumo auxiliar y maximizar la eficiencia neta (Chen et al., 2024; Stearns et al., 2025).

La integración CCS-ciclo abierto emerge en estudios actuales como una vía técnicamente plausible y económicamente prometedora, siempre que se optimice el equilibrio entre eficiencia del ciclo y la penalidad energética/capital introducida por la captura y compresión del CO₂.

3.4. Avances recientes en el ciclo de Brayton con SC-CO₂

En las últimas dos décadas el interés por los ciclos de potencia basados en dióxido de carbono supercrítico ha aumentado sustantivamente debido a las propiedades termo físicas del CO₂ cerca y por encima de su punto crítico (7,38[MPa] y 31,1[°C]) que permiten mayores eficiencias frente a ciclos convencionales (Molière et al., 2024; White et al., 2021). La literatura contemporánea muestra un esfuerzo sistemático en tres fuentes: la optimización termodinámica de configuraciones cerradas, el diseño y validación experimental de turbomáquinas y recuperadores compactos, y la integración de SC-CO₂ con distintas fuentes de calor, desde solar hasta ciclos de combustión y recuperación de calor residual (Liu et al., 2020; Tamilarasan et al., 2024; White et al., 2021).

Los trabajos teóricos y de simulación realizados por Miao et al. (2025) y Li et al. (2021) demuestran que las configuraciones cerradas pueden alcanzar eficiencias brutas elevadas en condiciones óptimas, con informes de valores brutos que se ubican aproximadamente entre 60% y 73% según el diseño del sistema y las condiciones de entrada del combustible utilizado.

Paralelamente, trabajos recientes de Molière et al. (2024) y White et al. (2021) han enfatizado la necesidad de afrontar las barreras prácticas a la industrialización del SC-CO₂ como son el diseño de intercambiadores de calor compactos con alta eficacia y baja pérdida de carga, caracterización del comportamiento transitorio cerca del punto crítico y adaptación de turbomáquinas para fluidos con densidades variables. Esto demuestra que el avance es sustancial en teoría y simulación, mientras que la demostración a escala industrial requiere todavía de ensayos de largo plazo y soluciones de ingeniería robustas.

3.5. Oportunidades y brechas de investigación

De la revisión realizada se desprenden oportunidades de investigación orientadas a optimizar el ciclo de Brayton abierto con SC-CO₂ + H₂O acoplado a CCS. En primer lugar, se requiere un modelado más preciso de mezclas CO₂ + H₂O a alta presión para mejorar la exactitud de las simulaciones termodinámicas (Li et al., 2021; Molière et al., 2024). Asimismo, es necesario estudiar de manera sistemática el efecto de pequeñas variaciones en la fracción de H₂O en el trabajo neto (Miao et al., 2025; Sadkin & Shchinnikov, 2025).

Por otro lado, un análisis tecno económico del sistema permite identificar configuraciones óptimas que equilibren eficiencia, costo y viabilidad operativa (Chen et al., 2024; Rogalev et al., 2022; Tamilarasan et al., 2024).

Finalmente, la implementación de simuladores basados en códigos abiertos con modelos termodinámicos ajustables es una alternativa para acelerar la investigación y favorecer la reproducibilidad de los estudios, además de entregar una posible ventaja frente a simuladores comerciales como Aspen en el ámbito de costos de licencias y exactitud de simulaciones.

4. Metodología

4.1. Enfoque general

El estudio se desarrolla bajo un enfoque analítico y computacional, donde a través de la implementación de un simulador se caracterizan la presión, temperatura y composición de cada corriente del proceso para analizar el efecto de la fracción de H_2O en la eficiencia del ciclo, además, agregando un enfoque en la optimización del proceso para mejorar la eficiencia y la generación de energía.

4.2. Selección de configuración de ciclo de Brayton abierto

A partir de las investigaciones realizadas por NETL (2017) junto con el estudio realizado por Zhu (2017), se considera para un ciclo de Brayton abierto que utiliza oxidación, la configuración que potencialmente puede generar la mayor eficiencia incluye un recuperador de la energía proveniente de la salida de la turbina, además de un proceso de condensación para la separación de agua seguida de un sistema de compresión y enfriamiento para el dióxido de carbono restante, la configuración se muestra a continuación.

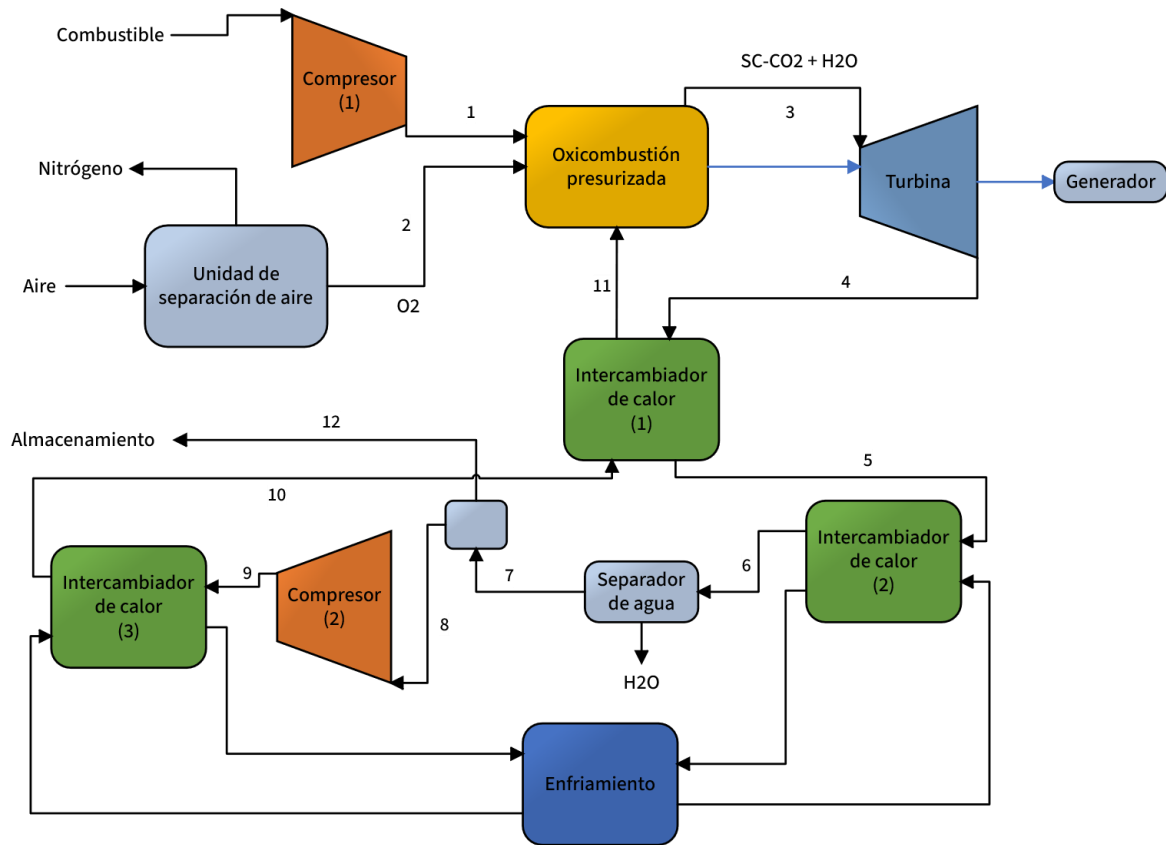


Figura 4: Configuración ciclo de Brayton abierto con oxidación

La secuencia lógica del flujo comienza con combustible comprimido (corriente 1) y la separación de oxígeno (corriente 2) a través de una unidad de separación de aire (ASU), ambas corrientes entran a una cámara de combustión de las cuales se produce una mezcla de dióxido de carbono supercrítico y agua (corriente 3) que entra a una turbina para generar energía (corriente azul). Al reducir su presión, la corriente de salida de la turbina (corriente 4) entra a un intercambiador de calor que actúa como recuperador del proceso (corriente 5) y luego a otro que actúa como condensador para separar el agua del flujo (corriente 6) y obtener una corriente de CO₂ puro mediante un separador (corriente 7). El CO₂ es dividido en una fracción destinada a almacenamiento (corriente 12) y la otra fracción destinada a ser recirculada en el ciclo (corriente 8), donde primero es comprimida (corriente 9) y enfriada (corriente 10) para disipar el calor de compresión y asegurar un gradiente térmico favorable, entrando luego al recuperador donde es precalentada para ingresar a la cámara de combustión (corriente 11). Cabe destacar que también se incluye un nodo de enfriamiento el cual entrega el flujo de servicio a los intercambiadores 2 y 3 para enfriar la corriente 5 y la corriente 9.

4.3. Modelación del ciclo

El uso del lenguaje Python entrega una forma más directa y configurable de resolver sistemas termodinámicos a través del uso de librerías, en este ámbito, la más destacable es CoolProp, capaz de calcular propiedades volumétricas y termodinámicas utilizando distintas ecuaciones

de estado según los parámetros de entrada (temperaturas, presiones, composiciones y caudales) y características de fluidos.

Al considerar el funcionamiento por defecto de la librería, para componentes puros se establece una relación a través de la energía libre de Helmholtz para el cálculo de propiedades termodinámicas ya que es una definición termodinámica precisa para condiciones de altas temperaturas y presiones, específicamente en el caso del dióxido de carbono (Bell et al., 2014). La relación expresa la energía libre molar en función de la densidad reducida (δ) y la temperatura reducida (τ):

$$A(\delta, \tau) = A^0(\delta, \tau) + A^r(\delta, \tau) \quad (4.1)$$

Donde A^0 representa la parte del gas ideal y A^r es la contribución residual asociada a las interacciones intermoleculares. Mediante la formulación de la ecuación 4.1, las propiedades termodinámicas se obtienen por derivadas parciales de A:

$$P = \rho RT \left[1 + \delta \left(\frac{\partial A^r}{\partial \delta} \right)_\tau \right] \quad (4.2)$$

$$h = RT \left[1 + \tau \left(\frac{\partial A^r}{\partial \tau} \right)_\delta + \delta \left(\frac{\partial A^r}{\partial \delta} \right)_\tau \right] \quad (4.3)$$

$$s = R \left[\tau \left(\frac{\partial A^0}{\partial \tau} \right)_\delta + \tau \left(\frac{\partial A^r}{\partial \tau} \right)_\delta - A^0 - A^r \right] \quad (4.4)$$

Donde R es la constante universal de los gases, ρ es la densidad molar, h es la entalpía molar y s es la entropía molar.

Para la contribución residual se utilizan las correlaciones de Span & Wagner (1996) en el caso del dióxido de carbono, válida en un rango de temperatura desde 216,6[K] hasta 1100[K] y presiones de hasta 800[MPa]; y de Wagner & Pruß (2002) para el agua, válida hasta 1273[K] y 1000[MPa]. Ambas correlaciones comparten la misma estructura funcional basada en la energía libre de Helmholtz, empleando una serie de coeficientes experimentales ajustados a datos termodinámicos de alta precisión, en el caso del CO₂, son obtenidos de NIST y en el caso del agua los parámetros ajustados por Wagner & Pruß constituyen el estándar internacional conocido como la formulación IAPWS-95.

$$A^r = \sum_i n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} + \sum_j n_j \delta^{d_j} \tau^{t_j} e^{-\alpha_j (\delta - \epsilon_j)^2 - \beta_j (\tau - \gamma_j)^2} \quad (4.5)$$

Según lo establecido en el desarrollo de ambos estudios, la combinación de ambas reglas puede entregar altos niveles de precisión, además de garantizar la continuidad numérica incluso en condiciones cercanas al punto crítico.

Para el manejo de mezclas (CO₂ y H₂O) se plantea utilizar el modelo de Peng-Robinson acoplado a la regla de mezclado de Van der Waals (FluidMech et al., 1973) con el objetivo de utilizar una opción computacionalmente ligera que permita realizar validaciones comparativas, especialmente con simuladores comerciales que utilizan el mismo modelo termodinámico gracias a su base teórica consolidada.

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a(T)}{v(v + b) + b(v - b)} \quad (4.6)$$

$$b = 0,07780 \cdot \frac{RT_{c,i}}{P_{c,i}} \quad (4.7)$$

$$a_{base} = 0,45724 \cdot \frac{R^2 T_{c,i}^2}{P_{c,i}} \quad (4.8)$$

$$v = 0,307 \cdot \frac{R \cdot T_{c,i}}{P_{c,i}} \quad (4.9)$$

$$a(T) = a_{base} \cdot \left[1 + k_i \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_{c,i}}} \right) \right]^2 \quad (4.10)$$

$$k_i = 0,37464 + 1,54226\omega_i + 0,26992\omega_i^2 \quad (4.11)$$

La regla de mezclado de Van der Waals tiene el objetivo de cuantificar la interacción molecular de mezclas en los parámetros termodinámicos globales de las mismas. Para utilizarla de forma acoplada con Peng-Robinson, se utiliza el parámetro a_{mix} y b_{mix} .

$$a_{mix} = \sum_i \sum_j x_i x_j \sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij}) \quad (4.12)$$

$$b_{mix} = \sum_i x_i b_i \quad (4.13)$$

Donde x_i y x_j representan las fracciones molares de los componentes, a_i y b_i representan los parámetros individuales de la ecuación de estado y k_{ij} representa un parámetro de interacción binaria obtenido de forma empírica o mediante ajuste experimental.

4.4. Definición de parámetros

Los parámetros críticos de cada componente utilizado en la simulación utilizados para el cálculo de la energía en la combustión se encuentran presentes en el anexo.

Para la regla de mezclado utilizada en la relación en base a la energía libre de Helmholtz se considera un factor base de la entalpía en exceso de $-5000[J/mol]$ aplicado para mezclas exotérmicas débiles y se incluye un límite inferior de $-10000[J/mol]$ utilizado como la máxima exotermia permitida (Bell et al., 2014a). Esto con el objetivo de establecer un rango de cálculo y así evitar la divergencia del simulador.

A continuación, se presentan los parámetros específicos utilizados para el uso de Peng-Robinson con regla de mezclado de Van der Waals para CO_2 y H_2O .

Tabla 1: Parámetros para Peng Robinson y regla de mezclado de Van der Waals

Nombre	Símbolo	Valor	Unidad	EoS	Referencia
Parámetro k_i para CO_2	k_i	0,7060	-	PR	(FluidMech et al., 1973)
Parámetro k_i para H_2O	k_i	0,8736	-	PR	
Parámetro a_{base} de CO_2	$a_{i\ base}$	0,3658	$\frac{Pa \cdot m^6}{mol^2}$	PR	
Parámetro a_{base} de H_2O	$a_{i\ base}$	0,5537	$\frac{Pa \cdot m^6}{mol^2}$	PR	
Parámetro b de CO_2	b_i	$2,6835 \cdot 10^{-5}$	$\frac{m^3}{mol}$	PR	
Parámetro b de H_2O	b_i	$1,4515 \cdot 10^{-5}$	$\frac{m^3}{mol}$	PR	(Spycher & Pruess, 2005)
Parámetro de interacción binaria	k_{ij}	0,1896	-	VdW	

4.5. Implementación de simulador con IA

Para el proceso de desarrollo del código del simulador se considera el uso de Visual Studio Code de Microsoft como editor de código de fuente debido a su carácter gratuito además de su amplia gama de funciones, específicamente por el uso de extensiones o complementos que ayudan al desarrollo y escritura de código. Respecto a lo último, una herramienta fundamental es la extensión de Claude Code, que permite utilizar las funciones de la inteligencia artificial Claude creada por la empresa Anthropic. El uso de Claude en la construcción del simulador es clave ya que es una IA especializada en la escritura y modificación de código, además de agregar documentación y con un enfoque explicativo de los cambios realizados (Anthropic, 2025).

En cuanto al orden de cálculo planteado para el simulador se consideran 3 secciones diferentes: simulación base, análisis de sensibilidad y optimización. Todas las secciones utilizan la misma lista de parámetros iniciales. Además, se incluyen 4 combustibles diferentes para el uso del simulador: Gas natural, gas de síntesis, etanol y propano

En función de condiciones estándar de estudios actuales, se establecen los siguientes valores a utilizar para la base de la simulación.

Tabla 2: Parámetros de entrada de simulador

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Temperatura ambiente	T_0	25	[°C]	(Yang et al., 2024)
Presión de combustión	P_3	30	[MPa]	
Presión de salida de turbina	P_4	3	[MPa]	
Eficiencia turbina	$\eta_{turbina}$	95	%	
Eficiencia compresor combustible	$\eta_{compresor1}$	89	%	
Eficiencia compresor CO ₂	$\eta_{compresor2}$	89	%	
Eficiencia recuperador	$\varepsilon_{recuperador}$	90	%	(Allam et al., 2017)
Flujo combustible	$\dot{n}_{combustible}$	50	[mol/s]	
Fracción de recirculación	$f_{recirculación}$	95	%	

Para la primera sección, considerando los parámetros de entrada, se obtienen los datos de entrada del combustible a la cámara de combustión y en base a estos se obtiene el flujo de oxígeno necesario. Entre el recuperador y la cámara de combustión se plantea un cálculo iterativo para determinar la temperatura de la corriente de recirculación que reingresa a la cámara de combustión y la temperatura de los productos de combustión (corriente 3), el resto de los bloques y corrientes del proceso se calculan en el mismo orden de enumeración del ciclo (Figura 4), el diagrama de flujo de cálculo propuesto se muestra a continuación.

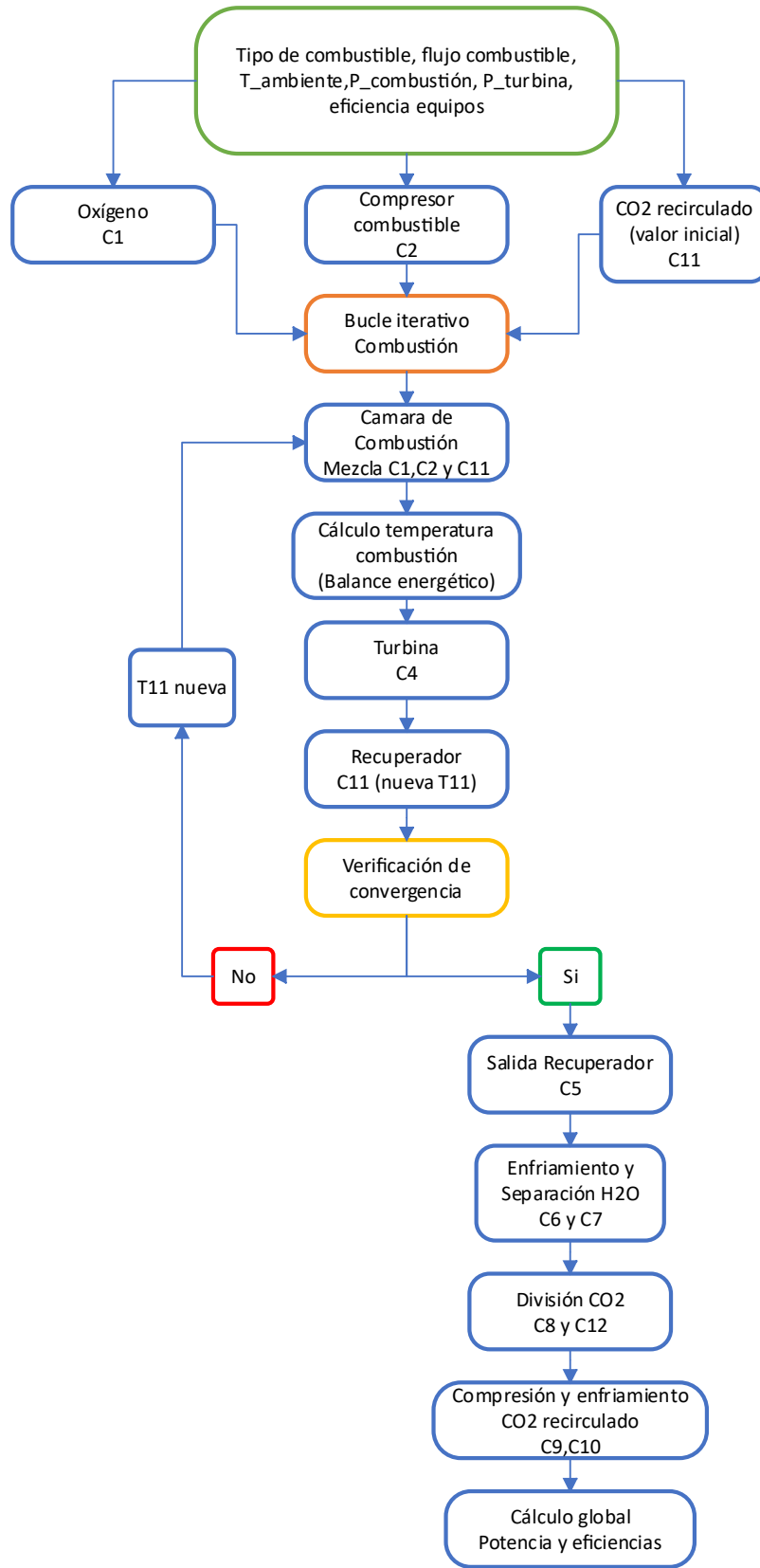


Figura 5: Diagrama de flujo de simulación

Para el análisis de sensibilidad, la lógica es similar al caso de la simulación, sin embargo, la diferencia principal se encuentra en que los parámetros de entrada serán tratados como una lista de datos. Para esto, se establece un rango para la fracción de recirculación y la cantidad de pasos del análisis, de esta forma el simulador entrega listados de propiedades termodinámicas de cada corriente del ciclo en base a cada paso del análisis de sensibilidad, además de un gráfico que compara la eficiencia global del ciclo y la potencia generada de la turbina, con el cambio en la fracción de agua en la corriente de la salida de la turbina la cual tiene dependencia directa con la fracción de recirculación de CO_2 . El diagrama de flujo del análisis de sensibilidad se muestra a continuación.

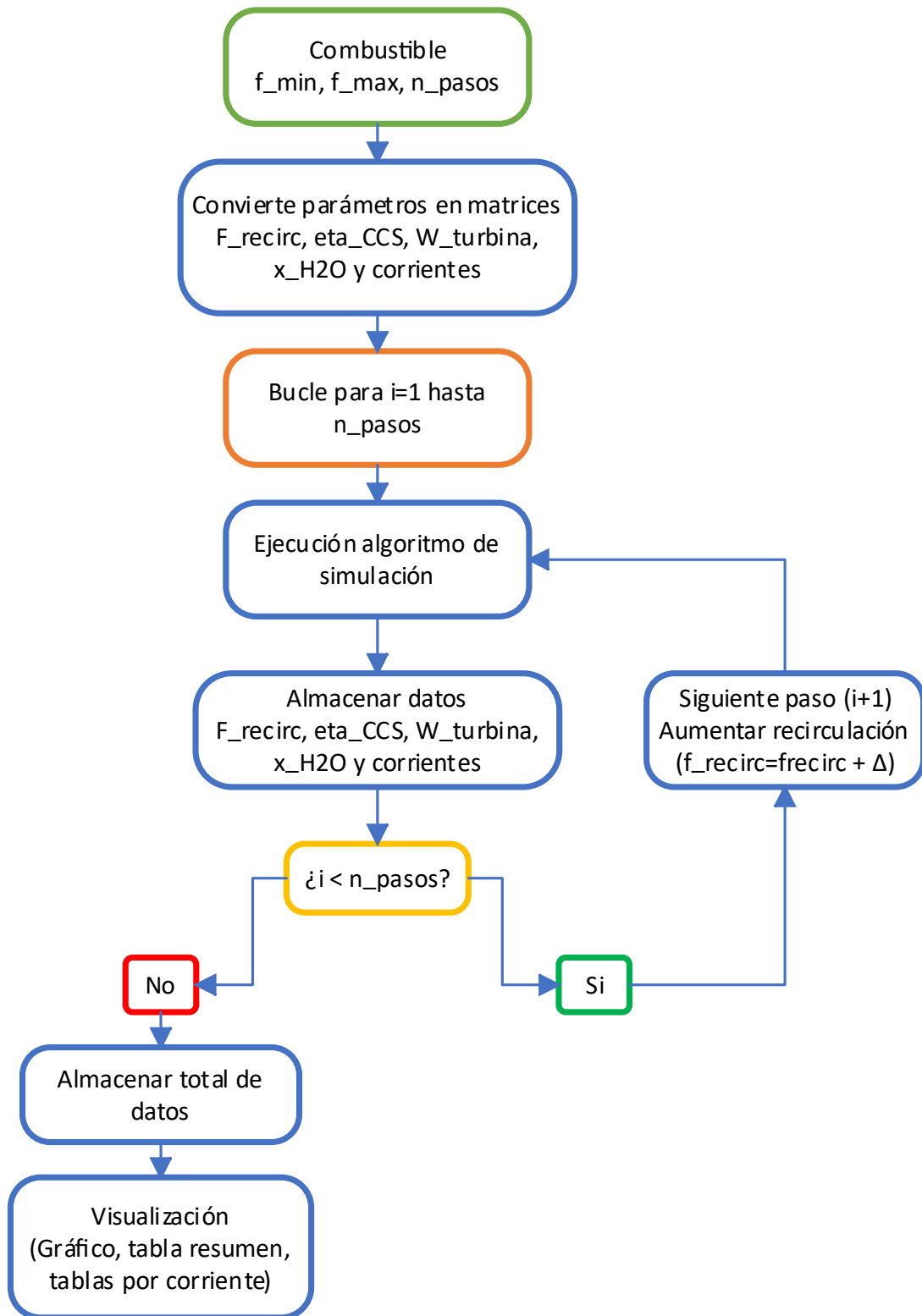


Figura 6: Diagrama de flujo de análisis de sensibilidad

En cuanto a la sección de optimización, consiste en un ajuste de la presión de combustión, la presión de salida de la turbina y la fracción de circulación de tal forma que maximicen la eficiencia del proceso sin comprometer las condiciones de manejo de CO₂ en estado supercrítico. Esto se incluye agregando restricciones en la presión y temperatura en la combustión y en la recirculación. Cabe destacar que los indicadores de eficiencias de los equipos (compresor, turbina y recuperador) quedan fuera del sistema de optimización ya que forman parte de condiciones de equipos por lo que son modificables, pero no optimizables. Para la estrategia de optimización, a través de la librería SciPy de Python, se utiliza el algoritmo de Evolución Diferencial (DE) el cual mantiene una población de posibles soluciones que evoluciona con el tiempo a través de operaciones de mutación, cruce y selección, buscando maximizar en este caso una función objetivo.

A partir de lo anterior se plantea que el proceso sea replicable para cada tipo de combustible además de que se incluya el número de iteraciones como un parámetro modificable que permita ajustar el nivel de precisión de la optimización. El diagrama de flujo propuesto para la sección de optimización se presenta a continuación.

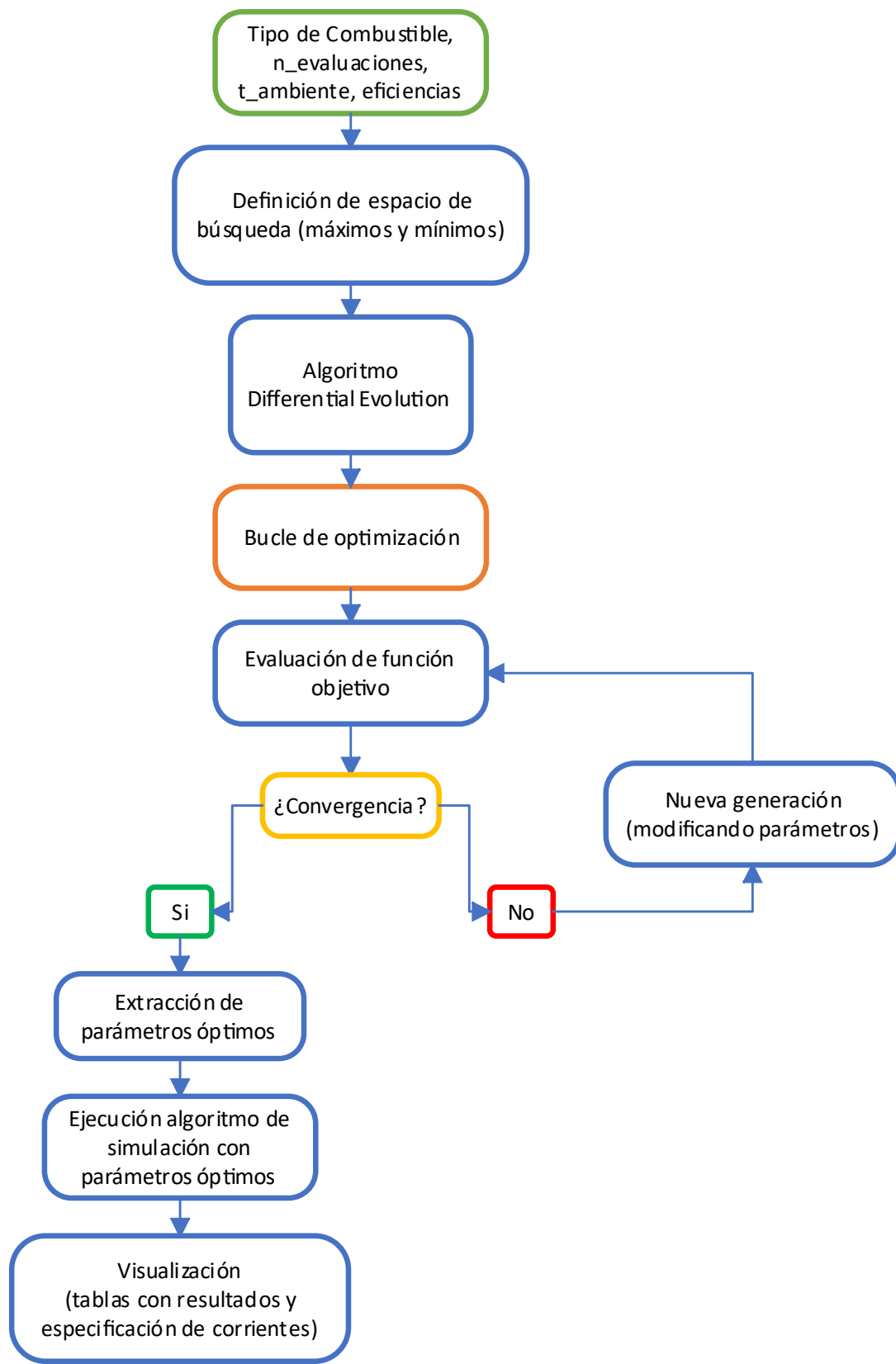


Figura 7: Diagrama de flujo de optimización

4.6. Selección de la tecnología de captura y almacenamiento de CO₂

La selección de tecnología de captura se basa en la evaluación de viabilidad termodinámica, eficiencia energética y costo operativo, considerando las alternativas de almacenamiento de dióxido de carbono ya que, en cuanto a la estrategia de captura, al considerar el oxígeno como entrada en lugar de aire, se determina el método de oxidación como la estrategia a utilizar la cual incluye el proceso de condensación post expansión de la turbina para luego comprimir y enfriar el CO₂ restante para su almacenamiento (Metz et al., 2005).

Respecto a las estrategias de almacenamiento estas se dividen en: almacenamiento geológico a través de la inyección en formaciones geológicas subterráneas porosas, almacenamiento mineral mediante reacciones químicas con minerales para formar carbonatos estables y el almacenamiento oceánico donde se inyecta el CO₂ en el fondo oceánico para permanecer disuelto o en forma de hidratos.

A pesar de que el abanico de posibilidades es bastante amplio en cuanto al almacenamiento de CO₂, para procesos industriales, especialmente para ciclo termodinámicos, la alternativa más adaptable es la de almacenamiento geológico (Metz et al., 2005), dentro de este existen 3 grandes ramas:

- Almacenamiento en acuíferos salinos profundos: Consiste en inyectar el CO₂ a profundidades mayores a 800 metros, donde la presión y temperatura del subsuelo garantizan su estado supercrítico, permitiendo una alta densidad y estabilidad de confinamiento. El gas se introduce en formaciones porosas saturadas con agua salina no potable, donde queda atrapado por una combinación de mecanismos estructurales, residuales, solubles y, a largo plazo, minerales (Bachu, 2008).
- Almacenamiento en yacimientos agotados de petróleo o gas: Mediante la reinyección del CO₂ en yacimientos agotados, debido a sus condiciones ideales de confinamiento y sellado, aseguran la estabilidad del dióxido de carbono posteriormente inyectado. Es una estrategia que podría incluir procesos de recuperación mejorada de petróleo (Enhanced Oil Recovery, EOR), donde el CO₂ actúa como agente miscible que desplaza crudos residuales, generando un beneficio económico adicional que reduce el costo neto de almacenamiento (Holloway, 2001).
- Almacenamiento mineral in situ en formaciones basálticas: En este proceso el SC-CO₂ es inyectado en formaciones rocosas ricas en minerales de calcio, magnesio, o hierro, donde reacciona con los cationes presentes para formar carbonatos estables (Metz et al., 2005).

Mediante un análisis de aspectos como el costo, el tiempo y dificultad de implementación y el consumo de energía se propone una alternativa que entregue un equilibrio entre los aspectos mencionados para ser acoplado a un ciclo de Brayton abierto.

4.7. Análisis comparativo de configuraciones del ciclo

El análisis comparativo tiene por objetivo evaluar las diferencias de desempeño termodinámico y energético entre el ciclo de Brayton simulado en el presente estudio (semiabierto) y un ciclo cerrado convencional de referencia basado en dióxido de carbono supercrítico puro. Esta comparación permite determinar si la incorporación del sistema de oxidación más la captura y almacenamiento de CO₂ aporta ventajas en eficiencia térmica, consumo energético y viabilidad económica respecto a los ciclos de referencia ampliamente estudiados en la literatura.

De esta forma, el análisis permite establecer una comparación de desempeño relativo bajo tres dimensiones principales:

1. Eficiencia termodinámica: Se evalúa la diferencia porcentual de eficiencia del ciclo (equivalente a la potencia neta generada sobre el poder calorífico y flujo de combustible) entre el ciclo cerrado y los valores obtenidos en la simulación de un ciclo abierto, identificando los factores que influyen en la pérdida o ganancia de eficiencia (principalmente relacionado a la fracción de vapor de agua, el trabajo de separación del CO₂ y el requerimiento energético de la unidad de separación de aire).
2. Consumo energético: Se analiza el impacto del sistema de compresión y separación sobre la potencia neta generada, considerando penalizaciones energéticas derivadas de la captura y recirculación del fluido de trabajo.
3. Costos y viabilidad técnica: Se comparan cualitativamente las implicancias económicas entre ambas configuraciones, considerando que el ciclo semicerrado reduce la necesidad de precalentamiento externo gracias a la combustión directa, pero introduce un costo adicional asociado al sistema de captura de CO₂.

A través de la selección de un ciclo de referencia, se plantea utilizar sus parámetros de operación para la simulación del ciclo de Brayton abierto y realizar el análisis de las dimensiones mencionadas.

4.8. Comparación con simuladores comerciales

Se plantea realizar un análisis comparativo entre el simulador desarrollado y un software comercial con funciones similares, en este caso Aspen HYSYS, considerando: configuración y flexibilidad, precisión y robustez de cálculo, tiempo de desarrollo vs tiempo de aprendizaje, y costo y accesibilidad.

La configuración y flexibilidad evalúa el grado de adaptabilidad que presenta cada enfoque para representar un ciclo de Brayton abierto o incorporar nuevas condiciones de operación. Considera la posibilidad de configurar la estrategia de cálculo y la facilidad para incluir nuevos componentes o subprocesos en el modelo.

En cuanto a la precisión y robustez de cálculo, se mide y compara la capacidad del modelo para ser ajustado o ampliado según los requerimientos de investigación, esto incluye el nivel

de parametrización y la versatilidad de cada herramienta frente a cambios tanto en la estructura como en las condiciones de entrada al ciclo.

Respecto al tiempo y desarrollo y aprendizaje, se considera la ventaja o en caso contrario la desventaja del tiempo de desarrollo de un simulador utilizando código abierto en comparación con el tiempo de aprendizaje en el manejo de simuladores comerciales, donde será considerado el esfuerzo de programación y la validación de los resultados en el caso del simulador desarrollado.

Por último, un factor clave en el análisis es el costo y accesibilidad, donde se hace referencia a aspectos como el costo asociado a licencias, soporte técnico e infraestructura computacional. Estos criterios son aplicados al desarrollo del simulador en base a su uso de un código abierto con la incorporación de una inteligencia artificial con opción de licencia de pago en contraste con un simulador comercial que considera el costo de adquisición y actualización, además de aspectos asociados a las limitaciones impuestas por los derechos de uso.

5. Desarrollo

5.1. Diseño de herramienta de simulación y algoritmos de cálculo

El desarrollo del simulador se lleva a cabo bajo un enfoque de co-creación asistida por la inteligencia artificial Claude Code como entorno de programación interactivo en el editor Visual Studio Code. Para asegurar una gestión de cambios precisa y facilitar la edición modular del sistema, se utiliza un repositorio en la nube a través de la plataforma GitHub.

La primera fase consiste en un proceso de entrenamiento fenomenológico de la IA para asegurar que el modelo comprenda las restricciones termodinámicas específicas de un ciclo de Brayton abierto con oxidación. Dentro de estas definiciones se considera una fracción de recirculación menor a 0,99 para garantizar la convergencia numérica, una temperatura máxima de combustión de 2000[°C] por limitaciones de la materialidad de equipos reales y el valor de presión mínima de 7,377[MPa] necesario para asegurar la condición de fluido supercrítico en el ciclo (Allam et al., 2017).

La segunda fase consiste en la implementación del módulo base de simulación, donde se integra el diagrama de flujo del ciclo para que la IA reconozca la secuencia de etapas y las interdependencias entre las corrientes. En esta etapa se incorpora la estrategia de cálculo definida, empleando la relación en base a la energía libre de Helmholtz para compuestos puros y la ecuación de Peng-Robinson con la regla de mezclado de Van der Waals para el manejo de mezclas. Además, en el uso de los 4 combustibles mencionados en la sección 4.5 se excluye la generación de impurezas de nitrógeno (N₂) o ácido sulfhídrico (H₂S) para asegurar la presencia exclusiva de carbono, hidrógeno y oxígeno en el ciclo. Finalmente, se genera el código base utilizando la librería de Streamlit para la interfaz web, junto con

CoolProp, Pandas, Numpy, Scipy, Plotly y Pillow para el procesamiento termodinámico y la visualización de resultados (Bell et al., 2014b; Clark & contributors, 2026; Harris et al., 2020; Inc., 2015; McKinney, 2010; Streamlit Team, 2026; Virtanen et al., 2020).

La tercera fase de desarrollo corresponde al módulo de análisis de sensibilidad, diseñado para evaluar el comportamiento del ciclo ante variaciones en los parámetros de operación. En esta etapa, la instrucción inicial a la IA consiste en programar la variación sistemática de la fracción de recirculación de CO₂ dentro de un rango definido, el objetivo técnico es establecer cómo este cambio en el flujo de retorno impacta directamente en la composición de la mezcla de trabajo, permitiendo observar la evolución de la fracción de agua en la corriente de salida de la turbina. Para la ejecución de este análisis, el simulador procesa los parámetros de entrada como matrices de datos, donde cada incremento en la recirculación genera un nuevo estado termodinámico para el ciclo. A partir de este cálculo iterativo, el módulo permite presentar los resultados de la variación de la fracción de agua y su correlación con indicadores críticos, como la eficiencia térmica global y la potencia neta generada por la turbina. Finalmente, se utilizan las capacidades gráficas de la misma interfaz (Streamlit) para visualizar estas tendencias.

La cuarta fase consiste en la implementación del módulo de optimización, donde la instrucción se centra en la configuración del algoritmo de Differential Evolution (DE) de la librería SciPy. El entrenamiento consiste en establecer un protocolo de selección que permite al usuario escoger entre los cuatro combustibles mencionados anteriormente y definir el número de evaluaciones o iteraciones necesarias para que el sistema alcance la convergencia. La directriz entregada a la IA para la búsqueda del óptimo consiste en la variación simultánea de tres variables: la presión de combustión, la presión de salida de la turbina y la fracción de recirculación. Se instruye al modelo para que el algoritmo identifique el punto de máxima eficiencia global del ciclo bajo estas condiciones dinámicas. Además, se entrega la instrucción de anexar una función de validación que asegure el cumplimiento de las restricciones operativas, principalmente la permanencia del fluido en estado supercrítico y los límites térmicos de los equipos.

Como última fase de entrenamiento del modelo de inteligencia artificial, se incorpora la instrucción de generar un sistema de exportación de datos en un archivo tipo CSV que contiene los datos obtenidos de la última simulación base, análisis de sensibilidad y optimización realizada, esto permite estudiar los datos brutos realizando análisis gráficos a elección.

5.1.1. Simulación Base y Optimización

Para la ejecución de la simulación base se utilizan los parámetros iniciales establecidos en la tabla 2 para los 4 combustibles presentes en el análisis. En el caso de la optimización, se considera un número máximo de evaluaciones de 2000 ya que permite un horizonte de exploración suficientemente amplio para el análisis. Dentro de los parámetros optimizables,

se establece un rango de 8,1 – 30[MPa] en el caso de la presión de combustión y un rango de 0,1-5[MPa] en la presión de salida de la turbina para asegurar régimen supercrítico en la combustión y para operar dentro de rangos óptimos para ciclos de oxidación (Zhu, 2017). Además, se establece un rango de 50-97% en la fracción de recirculación para establecer un límite que permita la estabilidad numérica y a su vez mantener controlada la temperatura en la salida de la cámara de combustión.

5.1.2. Simulación de Sensibilidad fracción de agua y fracción de recirculación

Como se menciona anteriormente, se utiliza la fracción de recirculación para controlar la fracción de agua en la turbina. Para el análisis de sensibilidad, se establece un rango de un valor mínimo de 0[-] y un valor máximo de 0,95[-] en la fracción de recirculación evaluando 50 pasos dentro del mismo, esto permite analizar en detalle el comportamiento de la eficiencia global del ciclo y la potencia de la turbina en comparación con la fracción de agua, esto aplicado para los 4 combustibles disponibles.

5.2. Selección de sistema de almacenamiento de SC-CO₂

Para la metodología de almacenamiento se establece el almacenamiento geológico como estrategia principal de la cual destacan 3 categorías: acuíferos profundos, yacimientos agotados de petróleo y minerales de formaciones basálticas. Según el reporte elaborado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) se establecen costos estimados en dólares por tonelada de dióxido de carbono (US\$/tCO₂) almacenado para acuíferos profundos (equivalentes a formación salina), y para yacimientos agotados de petróleo y gas. Cabe destacar que la información fue recopilada en el año 2005, sin embargo, a pesar de que los costos han aumentado por efectos de inflación, las proporciones de costos entre las distintas tecnologías se mantienen como una referencia válida (Metz et al., 2005).

Por otro lado, respecto al caso de las formaciones basálticas, solo existe un proyecto actual que opera a nivel comercial, la empresa CarbFix ubicada en Islandia ofrece una nueva tecnología para la captura y almacenamiento de CO₂, en formaciones basálticas. Sin embargo, el costo de almacenamiento reportado es cercano a los 10[USD\$/tCO₂ almacenado] (Carbfix hf., 2026) por lo que no es una opción competitiva frente a las alternativas presentadas en el reporte del IPCC.

Tabla 3: Costos estimados de almacenamiento de CO₂ para diferentes estrategias.

Tipo	Emplazamiento	Ubicación	USD\$/tCO ₂ almacenado			Comentarios	Naturaleza del valor central
			Bajo	Medio	Alto		
Formación Salina	Terrestre	Australia	0,2	0,5	5,1	Estadísticas de 20 sitios	Media
Formación Salina	Terrestre	Europa	1,9	2,8	6,2	Rango representativo	Valor más probable
Formación Salina	Terrestre	EE.UU	0,4	0,5	4,5	Casos bajo/base/alto para EE.UU	Caso base para parámetros promedio
Formación Salina	Marino	Australia	0,5	3,4	30,2	Estadísticas de 34 sitios	Media
Formación Salina	Marino	Mar del norte	4,7	7,7	12,0	Rango representativo	Valor más probable
Campo de petróleo agotado	Terrestre	EE.UU	0,5	1,3	4,0	Casos bajo/base/alto para EE.UU	Caso base para parámetros promedio
Campo de gas agotado	Terrestre	EE.UU	0,5	2,4	12,2	Casos bajo/base/alto para EE.UU	Caso base para parámetros promedio
Campo abandonado de petróleo o gas	Terrestre	Europa	1,2	1,7	3,8	Rango representativo	Valor más probable
Campo en desuso de petróleo o gas	Marino	Mar del norte	3,8	6,0	8,1	Casos bajo/base/alto para EE.UU	Valor más probable

Dentro de la tabla resumen es destacable que la estrategia de yacimientos agotados de petróleo (Depleted oil fields) tiene un costo promedio de almacenamiento más bajo respecto a opciones de formación salina, específicamente en opciones ubicadas en Australia, lo que demuestra en este escenario que desde una perspectiva de costo es la alternativa más atractiva debido principalmente al ahorro en inversión inicial por la infraestructura destinada al almacenamiento.

En cuanto al tiempo y dificultad de implementación, existe una ventaja clara en el caso de la estrategia de yacimientos agotados, este tipo de estructuras cuentan con pozos de perforación y ductos ya implementados a diferencia del caso de formaciones salinas que requieren una mayor inversión inicial para estructuras como pozos de perforación, además de incluir la inversión asociada a los estudios de suelos para evaluar la inyección de CO₂ supercrítico. Además, la reutilización de yacimientos agotados se encuentra en una fase madura de mercado (TRL 9), es decir, es una tecnología replicada en múltiples proyectos a nivel mundial, aunque con mayor presencia en Estados Unidos, esto refleja una tendencia en su uso por aspectos como su facilidad de implementación en proyectos nuevos.

Por último, considerando el aspecto de consumo energético, según el reporte se establece una regla general de aumento del consumo energético en proyectos de energía que incluyen almacenamiento geológico (yacimientos o formaciones salinas) entre un 10% y un 40% (Metz et al., 2005), este aumento además puede ser afectado por la estrategia de transporte e inyección utilizada para el CO₂. La única diferencia significativa en el consumo energético es en comparación con las formaciones basálticas ya que requieren de una mayor energía para acelerar la reacción química natural que permite el almacenamiento de CO₂ en formato rocoso.

Al considerar los aspectos analizados a través de la información disponible por el reporte global sobre estrategias de almacenamiento de CO₂, se consideran los yacimientos agotados de petróleo como la alternativa óptima para ser acoplada a un ciclo de Brayton abierto, principalmente por el factor económico diferenciador de su reducida inversión inicial gracias a la existencia de instalaciones adaptables para la inyección de CO₂, además, gracias a su madurez de mercado, es una estrategia estudiada ampliamente lo que reduce tanto su dificultad como su tiempo de implementación.

5.3. Selección de ciclo cerrado de referencia

Para el análisis comparativo, se selecciona como referencia el ciclo de recompresión de dióxido de carbono supercrítico de 10MW desarrollado por el laboratorio nacional de tecnología energética de Estados Unidos (NETL). Este modelo utiliza una fuente de calor externa mediante un quemador de gas natural, lo que facilita la comparación técnica con un ciclo de combustión directa. En base a lo anterior, se considera la simulación en Aspen Plus del ciclo de recompresión realizada en el estudio de Liese et al. (2020).

El proceso comienza cuando el dióxido de carbono en estado supercrítico es calentado en el intercambiador de calor primario (PHX), el cual recibe energía térmica de forma indirecta desde un horno de gas natural. Este fluido a alta presión y temperatura se expande posteriormente en la turbina (TRB), generando la potencia necesaria para mover el generador y los compresores, mientras reduce simultáneamente su presión y temperatura. Al salir de la turbina, el gas de escape aún conserva una cantidad significativa de energía térmica que es

recuperada a través de dos intercambiadores de calor dispuestos en serie: el recuperador de alta temperatura (HTR) y el recuperador de baja temperatura (LTR).

Una característica distintiva de esta configuración ocurre tras la salida del fluido por el lado caliente del LTR, donde el flujo se divide en dos corrientes diferenciadas. La corriente principal se dirige hacia el sistema de enfriamiento (CoolSys), donde un enfriador de circuitos impresos (PCHE) reduce la temperatura del SC-CO₂ hasta aproximadamente 35°C, manteniéndola justo por encima del punto crítico para optimizar la densidad del fluido antes de ingresar al compresor principal (MC). Por otro lado, la fracción de flujo restante se desvía directamente hacia el compresor de bypass (BC), evitando el enfriamiento previo.

Finalmente, las dos corrientes comprimidas se reúnen en un punto de mezcla antes de iniciar el proceso de precalentamiento. El fluido combinado atraviesa primero el lado frío del recuperador de baja temperatura y luego el de alta temperatura, absorbiendo el calor remanente de los gases de escape de la turbina antes de regresar al intercambiador de calor primario para reiniciar el ciclo. Para gestionar las variaciones de carga y mantener la estabilidad operativa, el sistema emplea un tanque de almacenamiento de inventario (IST) que permite ajustar la masa total de SC-CO₂ circulante.

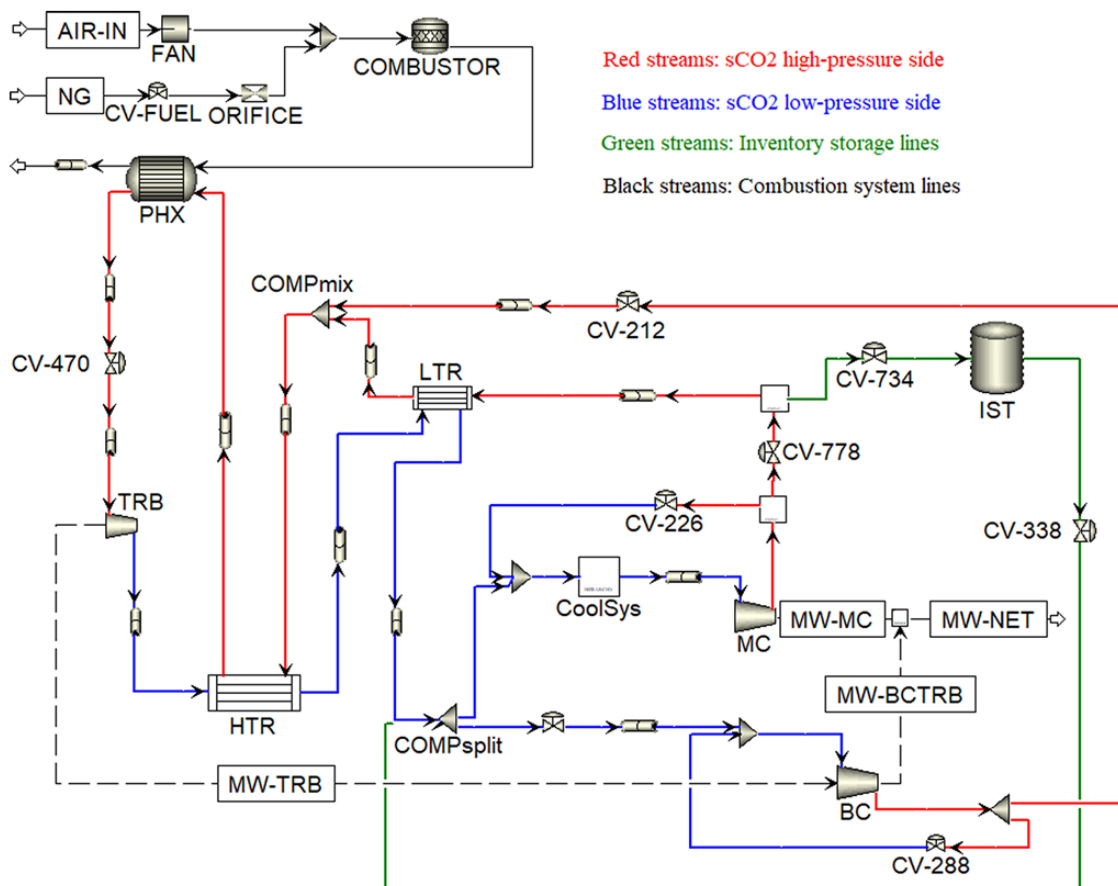


Figura 8: Diagrama de ciclo cerrado de recompresión (Liese et al., 2020).

La siguiente tabla detalla las condiciones de operación presentadas en el estudio de referencia.

Tabla 4: Condiciones nominales de operación de ciclo cerrado de recompresión.

Parámetro de Proceso	Valor	Unidad
Temperatura de entrada a turbina	715	[°C]
Presión de salida de turbina	8,7	[MPa]
Presión de entrada de turbina	24	[MPa]
Flujo de SC-CO ₂ en el ciclo	2240,45	[mol/s]
Eficiencia isentrópica de compresor principal	78	[%]
Eficiencia isentrópica de turbina	87	[%]
Eficiencia recuperador (HTR y LTR)	95	[%]
Trabajo total compresión	4,8	[MW]
Potencia turbina	15,2	[MW]
Potencia Neta	10,4	[MW]
Eficiencia global	44,4	[%]

Para adaptar el simulador del ciclo de Brayton abierto se deben tener 2 consideraciones.

1. Razón de presión: para ciclos abiertos, existe una restricción donde la razón de presión entre la entrada y salida debe estar dentro de un rango entre 6 y 12 (Zhu, 2017), por lo que no es posible replicar las condiciones exactas de presión del ciclo de referencia, que considera una razón de presión de 2,8.
2. Flujo de SC-CO₂ en el ciclo: En el ciclo cerrado, el flujo de dióxido de carbono supercrítico es un parámetro fijo, a diferencia del ciclo abierto que depende de la recirculación, además del tipo y cantidad de combustible.

En base a lo anterior, a modo comparativo, se realiza una simulación donde se utiliza la presión de salida de referencia de la turbina y se adapta la presión de entrada para cumplir con la razón de presión permitida. Además, para incluir un segundo caso comparativo, se realiza una simulación donde se utiliza la presión de entrada de referencia de la turbina y se adapta la presión de salida. Para ambos casos, se establece un flujo de combustible de entrada con el objetivo de mantener la potencia neta generada en 10[MW] y se utilizan las mismas eficiencias de equipos (compresor principal y turbina). El combustible utilizado para las simulaciones comparativas es el gas natural para mantener la igualdad de condiciones.

Tabla 5: Parámetros de entrada simulación comparativa

Parámetro	Unidad	Ciclo cerrado	Ciclo abierto presión alta	Ciclo abierto presión baja
Presión de entrada Turbina	[MPa]	24	87	24
Presión de salida Turbina	[MPa]	8,7	8,7	2,4
Flujo de combustible	[mol/s]	115,96	41,1	35,5
Potencia generada	[MW]	15,2	22,31	18,41

6. Análisis y discusión de resultados

6.1. Resultados y análisis de simulación

A partir de los parámetros establecidos en la Tabla 2, se obtienen los resultados de simulación para cada combustible en el módulo de simulación base y el módulo de optimización.

Tabla 6: Parámetros optimizados en simulación

Variable	Caso	Valor inicial	Valor optimizado
Fracción de recirculación	Etanol	0,95 [-]	0,9094[-]
	Propano		0,9367[-]
	Gas de Síntesis		0,8933[-]
	Gas Natural		0,9418[-]
Presión de combustión	Etanol	30 [MPa]	8,119[MPa]
	Propano		8,137[MPa]
	Gas de Síntesis		8,118[MPa]
	Gas Natural		8,177[MPa]
Presión de turbina	Etanol	3 [MPa]	0,677[MPa]
	Propano		0,678[MPa]
	Gas de Síntesis		0,677[MPa]
	Gas Natural		0,681[MPa]

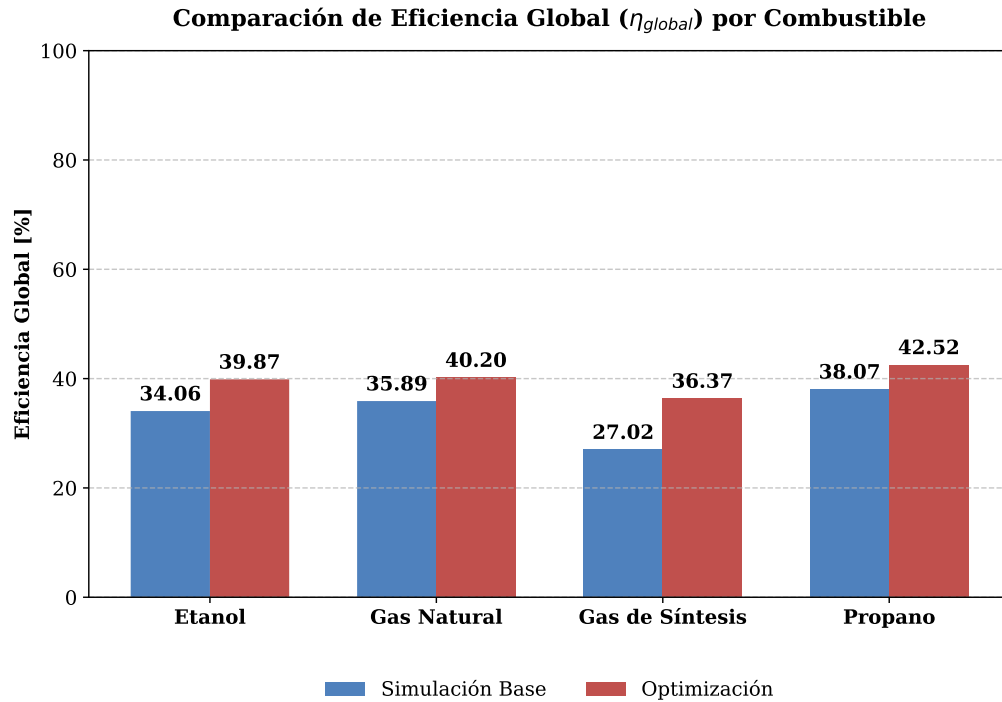


Figura 9: Gráfico comparativo eficiencia global de Etanol, Gas Natural, Gas de Síntesis y Propano

Respecto a los parámetros optimizados, es posible notar una igualdad en la fracción de recirculación. Esta variable se encuentra dominada por la restricción de la temperatura en la cámara de combustión. Un comportamiento similar ocurre con la presión de entrada y salida de la turbina, sin embargo, el ajuste de la presión de entrada es sustancial, esto se debe a que el simulador considera como caso ideal cuando la presión de combustión se encuentra lo más cercana posible a la presión crítica del CO_2 . Tomando este fenómeno como base, es correcto asumir que la presión de la combustión tiene un efecto importante en la eficiencia del sistema y la potencia generada, debido a que controla el trabajo necesario por parte de los compresores tanto del combustible como de la unidad de separación de aire (ASU). Cabe destacar que, a pesar de que la temperatura en la combustión no tiene influencia directa en la eficiencia del ciclo, sí influye en las restricciones físicas de su funcionamiento ya que establece el flujo de recirculación de dióxido de carbono en el ciclo, lo que a su vez modifica la cantidad de CO_2 que debe ser comprimido para su almacenamiento.

En términos de eficiencia máxima, los 4 combustibles mantienen valores similares en donde se destaca el propano como el combustible de mayor eficiencia y el gas de síntesis como el de menor eficiencia. En este escenario, las diferencias no son suficientemente significativas para determinar un combustible de mayor rendimiento de forma absoluta. Por lo tanto, la elección final para un caso de uso específico está estrictamente relacionada con la disponibilidad del recurso y su costo de mercado.

De forma análoga, se obtienen los resultados de simulación para cada combustible en el módulo de análisis de sensibilidad, comparando la fracción de agua en la salida de la turbina y el porcentaje de recirculación de dióxido de carbono a la cámara de combustión.

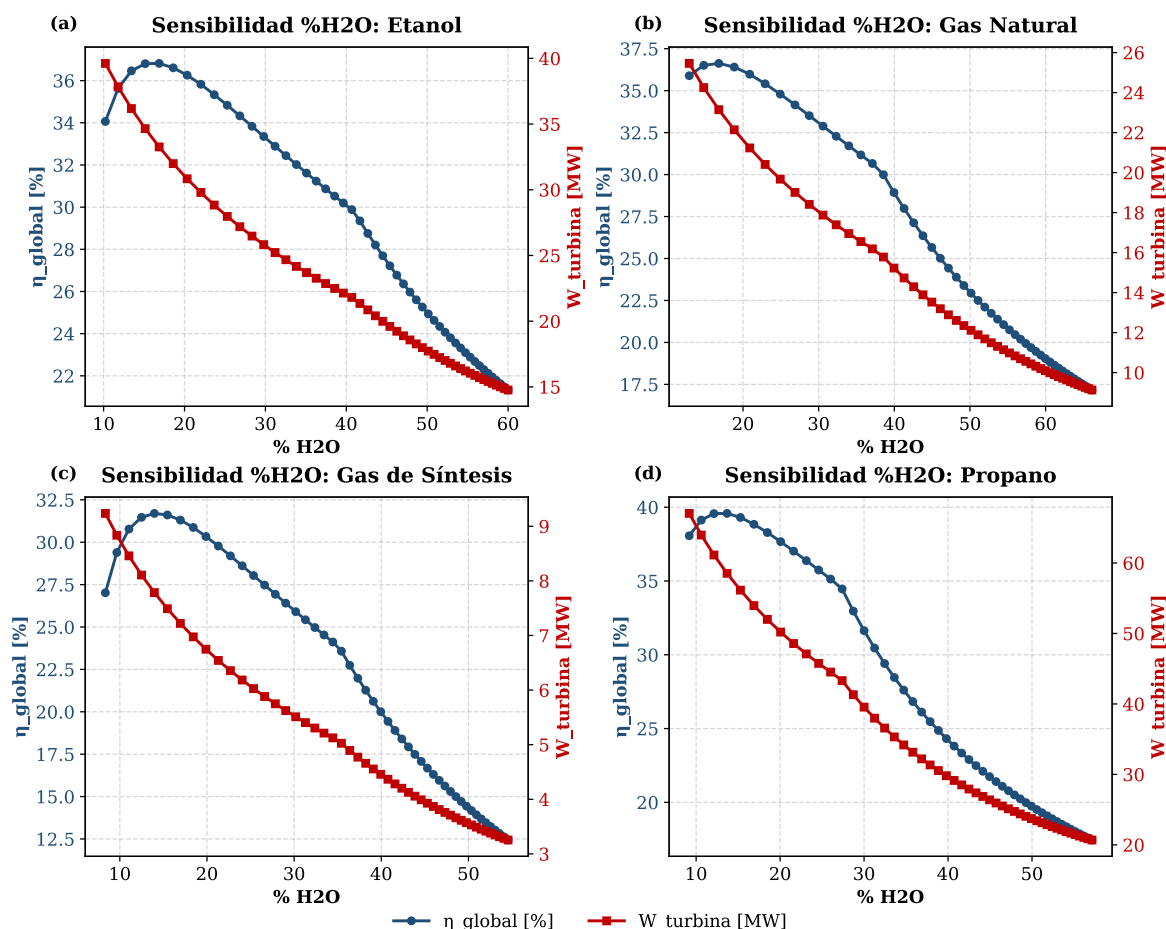


Figura 10: (a) Gráfico sensibilidad H_2O simulación de Etanol, (b) gráfico sensibilidad H_2O simulación de Gas Natural, (c) gráfico sensibilidad H_2O simulación de Gas de Síntesis, (d) gráfico sensibilidad H_2O simulación de Propano.

A pesar de ser 4 combustibles distintos, su comportamiento es similar al modificar la fracción de recirculación y por consiguiente la fracción de agua en la entrada de la turbina, en todos los casos a medida que aumenta la fracción de agua desde 5 a 15% la eficiencia aumenta, pero la potencia disminuye. Luego desde 15 hasta valores sobre 50%, tanto la eficiencia como la potencia de la turbina disminuyen.

Las principales diferencias dependen de valores máximos alcanzados tanto en eficiencia como en potencia de la turbina, ligadas a relación carbono/hidrógeno de cada combustible, factor que define la densidad energética del combustible y la fracción de vapor de agua resultante en los gases de escape. Por otro lado, existe una discontinuidad en el comportamiento de la eficiencia global y la potencia de la turbina, este fenómeno ocurre debido a la interacción de 3 efectos.

1. Trabajo del compresor: Para aumentar la fracción de agua en la turbina, es necesario disminuir la recirculación de CO_2 . Esto implica que el trabajo consumido por el compresor de recirculación se reduce al procesar un caudal menor, lo que ejerce un efecto positivo al restar menos energía neta al ciclo.
2. Potencia de la turbina: Al disminuir la recirculación de CO_2 , se reduce el caudal másico total que ingresa a la turbina. Esto provoca una reducción en la potencia generada de la turbina, ejerciendo un impacto negativo en la eficiencia.
3. Recuperación de calor: Debido a que la salida de la turbina conecta con un recuperador de calor que aumenta la temperatura de la recirculación, la energía necesaria para la combustión es menor, esto se traduce en un efecto positivo en la eficiencia.

La interacción de los 3 efectos que, inicialmente el beneficio del ahorro de combustible por la recuperación de calor y el menor consumo energético en el compresor logran mitigar la caída en el flujo, generando una derivada positiva en la eficiencia global. Sin embargo, existe un punto de quiebre en el que el recuperador de calor alcanza un máximo operativo de diseño y se satura, quedando incapacitado para transferir más energía a la recirculación. Al desaparecer este efecto, se provoca la discontinuidad en la gráfica de eficiencia. A partir de este quiebre (sobre el 15% de H_2O), el sistema queda dominado exclusivamente por el primer y el segundo efecto, es decir, la pérdida masiva de caudal que atraviesa la turbina supera el ahorro energético en la compresión, arrastrando la eficiencia global de forma descendente.

Por otra parte, se identifica otro quiebre en la gráfica de eficiencia. Este comportamiento responde a la variación no lineal de las propiedades termofísicas de la mezcla de CO_2 y H_2O . el aumento de humedad reduce de forma acelerada la densidad del fluido al abandonar el régimen denso supercrítico. En ausencia de una masa densa para el funcionamiento de la turbina, se castiga severamente el salto entálpico afectando directamente la potencia generada y por consiguiente la eficiencia del ciclo.

Al considerar los 3 efectos, es correcto asumir que existe un máximo teórico para cada caso estudiado en el que la eficiencia global alcanza su valor más alto, sin embargo, existe una restricción térmica para el uso de turbinas en ciclos termodinámicos en donde su temperatura no puede exceder los 2000°C por la resistencia de materiales en la turbina (Allam et al., 2017). Para el caso del uso de propano, se presenta el análisis de sensibilidad incluyendo la temperatura de combustión.

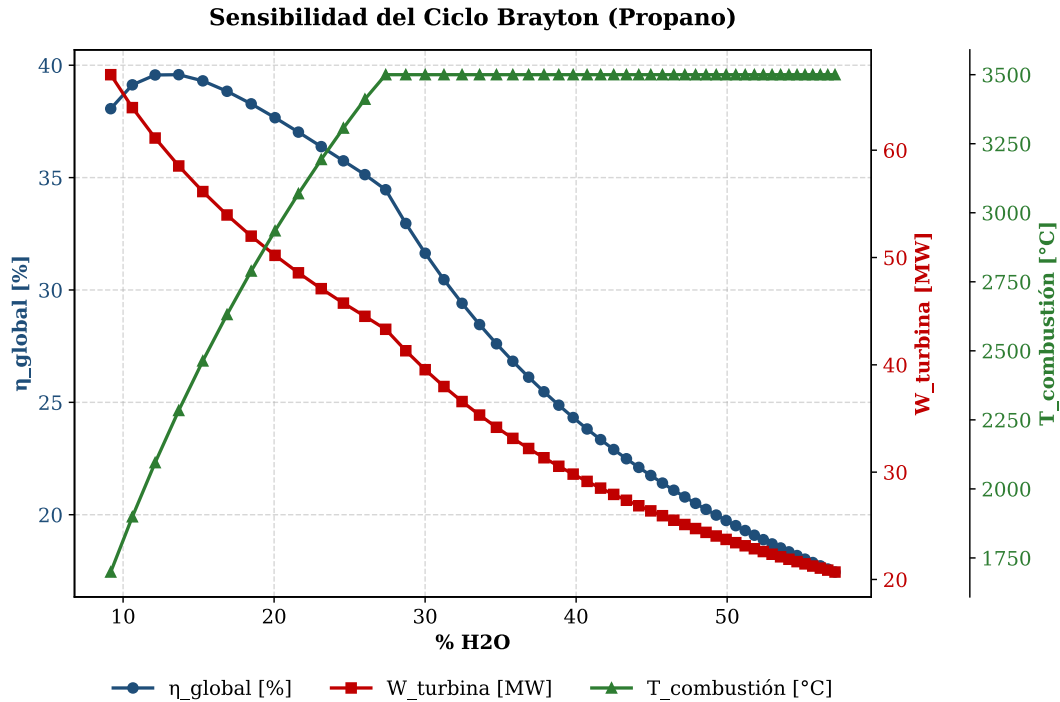


Figura 11: Gráfico sensibilidad H₂O simulación de Propano + temperatura de combustión

La figura 11 muestra un comportamiento creciente de la temperatura al reducir la fracción de recirculación, alcanzando un máximo que el simulador aplica para mantener la consistencia de cálculo y evitar la no convergencia. De esta manera, se comprueba que la fracción de agua tiene una influencia indirecta en el comportamiento de la potencia generada de la turbina y la eficiencia global del ciclo, en donde a medida que la fracción agua aumenta (recirculación disminuye) la potencia y la eficiencia se ven afectadas de forma negativa producto de un menor flujo en la turbina, lo que a su vez se traduce en una menor potencia generada. Además, se determina que un máximo real solo puede ser alcanzado en fracciones de agua bajo 0,12 en la turbina, lo que restringe la fracción de recirculación de dióxido de carbono por sobre 0,9.

6.2. Comparación de ciclo abierto vs ciclo cerrado

6.2.1. Eficiencia Termodinámica

A través de las simulaciones realizadas utilizando los parámetros de la tabla 5 se obtienen los resultados de eficiencias del ciclo para cada caso, cabe destacar que la eficiencia del ciclo no incluye el consumo de la unidad de separación de aire y el consumo de la compresión de combustible.

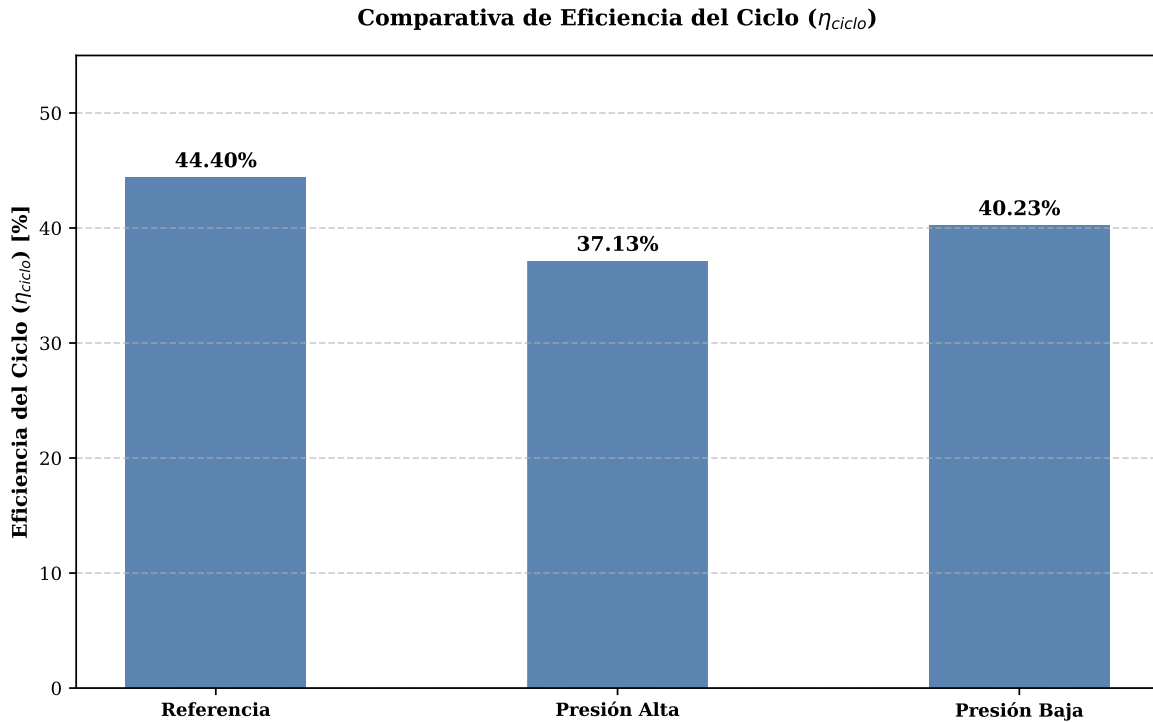


Figura 12: Gráfico comparativo eficiencias ciclo cerrado y ciclo abierto a presión alta y baja

A partir de la figura 12 se destaca la eficiencia ligeramente superior del ciclo cerrado de referencia en comparación con el ciclo abierto en su funcionamiento a presión alta y baja, esto se debe principalmente al efecto de la recompresión, que distribuye la carga de la compresión en distintos equipos logrando un consumo menor, a diferencia del ciclo abierto que utiliza solo un compresor lo que aumenta de forma exponencial la potencia requerida para lograr el nivel de presión utilizado en la combustión. Cabe mencionar que el diseño de sistemas de recompresión tienen como objetivo maximizar la eficiencia térmica de un proceso, sin embargo, esto no implica que sean capaces de entregar mayor energía, como es el caso del ciclo abierto, a pesar de no tener niveles de eficiencia comparables, son capaces de generar una mayor cantidad de energía con un menor uso de combustible como se muestra en la tabla 5.

De esta forma se confirma que un ciclo cerrado es capaz de entregar una mayor eficiencia energética en comparación a un ciclo abierto a través de oxicomustión en condiciones de alta y baja presión, gracias al efecto de la división del trabajo de compresión en distintas fracciones del flujo de trabajo.

6.2.2. Consumo Energético

A partir de la simulación anterior, se obtiene el desglose del consumo energético para los 3 casos de estudio.

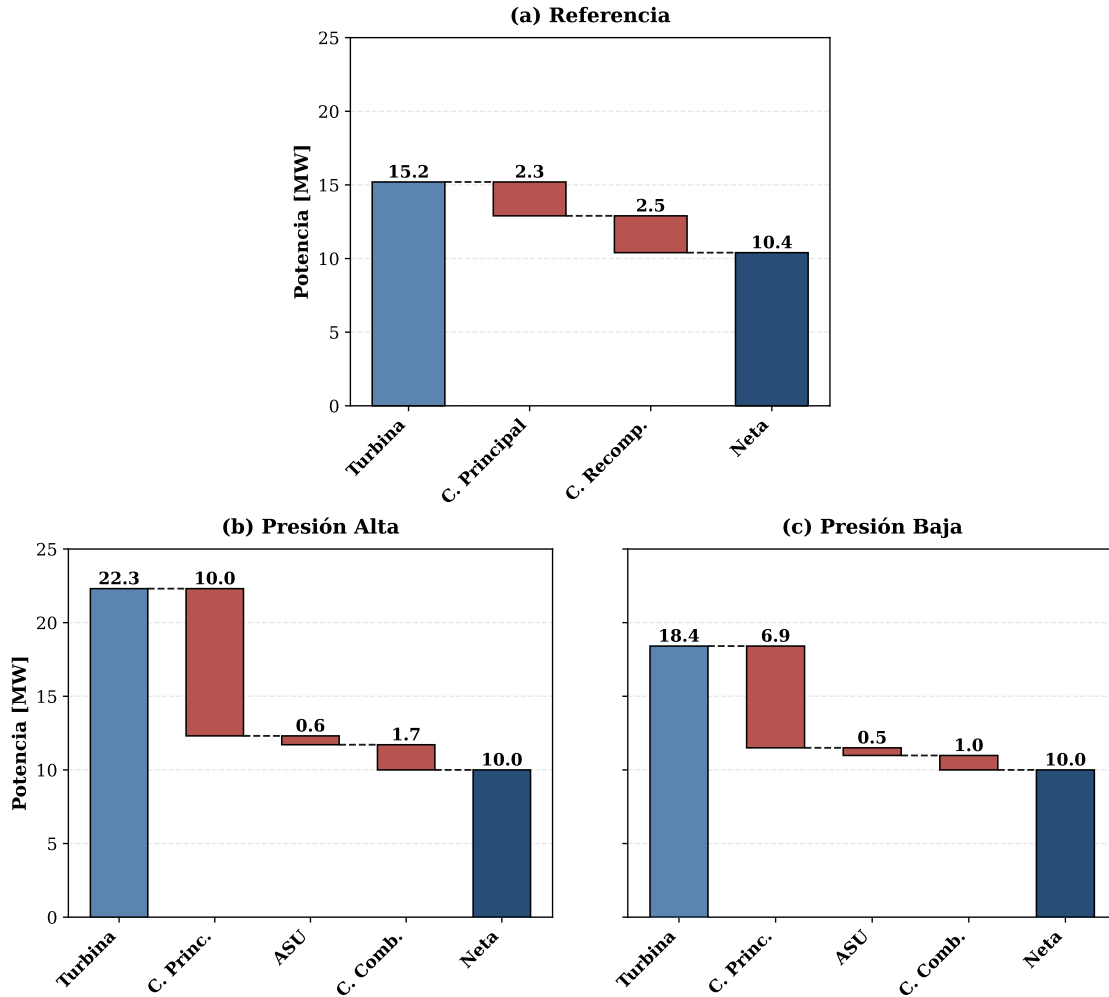


Figura 13: (a) Gráfico de potencia ciclo cerrado de referencia, (b) Gráfico de potencia ciclo abierto a presión alta, (c) Gráfico de potencia ciclo abierto a presión baja.

El consumo observado por parte de los compresores confirma el análisis anterior, para el ciclo cerrado, gracias a la división del flujo, la carga de los compresores combinada es menor en comparación a pesar de manejar un mayor flujo de dióxido de carbono supercrítico que el ciclo abierto. Por otro lado, en el caso del ciclo abierto, el funcionamiento a presión baja ofrece un consumo energético menor por parte del compresor principal debido a la presión alcanzada en el mismo, es decir, mientras más baja sea la presión necesaria en la compresión, menor será el consumo energético. Respecto a la energía requerida por el ASU y por el compresor de combustible, no es posible realizar una comparación directa entre ambos ya que dependen estrictamente del flujo de combustible utilizado, sin embargo, es posible visibilizar que su consumo es considerablemente menor en comparación, esto debido a que ambos equipos manejan un volumen sustancialmente más bajo que el compresor que forma parte del ciclo.

Al comparar con el diseño de un ciclo cerrado de recompresión, un ciclo abierto que utiliza oxidcombustión es diseñado con el objetivo de maximizar la potencia generada, asumiendo penalizaciones en eficiencia energética, esto es observable en la figura 13 a través de la potencia neta, a pesar de que todos los casos son adaptados para generar 10[MW], el ciclo abierto, en alta y baja presión, utiliza cerca de un tercio del flujo de combustible que utiliza el ciclo cerrado para generar la misma cantidad de energía, esto debido a la presencia de la combustión directa, que permite: aumentar la masa que se expande al producir internamente SC-CO₂, mejorar las propiedades del fluido al incluir la presencia de H₂O que posee una capacidad calorífica mayor que la del CO₂ y aumentar la temperatura de entrada logrando un salto de entalpía mayor en la turbina, lo que se traduce en una mayor potencia generada.

Con el análisis realizado se comprueba que el consumo de energía en un ciclo abierto es mayor en comparación a un ciclo cerrado, por el uso de un único equipo para comprimir un flujo alto de SC-CO₂. En contraste, el ciclo abierto posee una mayor generación de energía por cantidad de combustible en comparación al ciclo cerrado gracias al efecto de la combustión interna, a diferencia del ciclo cerrado, en el que la combustión solamente cumple la función de calentar el fluido de trabajo (SC-CO₂).

6.2.3. Costos y viabilidad técnica

Se realiza una estimación del costo de inversión para cada caso, incluyendo exclusivamente el costo de equipos siendo valor más representativo del costo global de un ciclo. En ambos casos se utiliza un modelo que sigue una ley de potencia escalada en función de un parámetro de diseño representativo (Weiland et al., 2019).

$$C = a \cdot (SP)^b \cdot f_T \quad (6.1)$$

Según la ecuación 6.1, **C** corresponde al costo del componente en USD, **a** y **b** corresponde a coeficientes empíricos de ajuste específicos para la tecnología del componente, **SP** corresponde al parámetro de escala y **f_T** corresponde a un factor de corrección por temperatura, aplicado cuando la temperatura de operación exige materiales de alto costo en el caso de la turbina y de recuperadores.

$$f_{T,turbina} = 1 + 1,106 \cdot 10^{-4} \cdot (T_{max} - 550) \quad (6.2)$$

$$f_{T,recuperador} = 1 + 0,02141 \cdot (T_{max} - 550) \quad (6.3)$$

A partir de los parámetros de referencia presentados en el estudio de Weiland et al, y los resultados obtenidos del estudio de Liese et al. se muestran los costos estimados de los equipos principales para el ciclo cerrado de recompresión.

Tabla 7: Estimación costos de equipos para ciclo cerrado de recompresión

Equipo	SP	a	b	$T_{max}[^{\circ}\text{C}]$	f_T	Costo[USD]
Calentador Primario	21,8[MW]	632900	0,6	700	1	\$4,008,185
Turbina Axial	15,2[MW]	182600	0,5561	715	4,01	\$3,327,949
Compresor Principal	2,3[MW]	1230000	0,3992	35	1	\$1,717,080
Compresor secundario	2,5[MW]	1230000	0,3992	75	1	\$1,774,890
Recuperador Alta Temperatura	7700000[W/K]	49,45	0,7544	586	1,771	\$11,834,166
Recuperador Baja Temperatura	3685714[W/K]	49,45	0,7544	250	1	\$3,837,171
Enfriador Principal	1170000[W/K]	32,88	0,7500	85	1	\$1,167,733
TOTAL						\$27,667,174

Para la estimación de los equipos del ciclo abierto de oxidación, se utiliza la ecuación 6.1 para la turbina de expansión y la cámara de combustión. En el caso del ASU y la captura de CO₂ se utiliza la metodología de escalamiento proporcionada por el National Energy Technology Laboratory (NETL, 2019).

$$SC = RC \cdot \left(\frac{SP}{RP}\right)^b \quad (6.4)$$

Donde **SC** es el costo escalado, **RC** el costo de un equipo a escala comercial de referencia proporcionado por NETL y **RP** la capacidad de dicho equipo de referencia. Para el caso de mayor eficiencia (caso a presión baja) se obtienen los costos estimados de los principales equipos en el ciclo.

Tabla 8: Estimación costos de equipos para ciclo abierto de oxidación a presión baja

Equipo	SP	a/RC	b	T_{max} [°C]	f_T	Costo [USD]
Unidad de Separación de Aire (ASU)	95,9[ton/día]	RC=\$150M (RP=5000[ton/día])	0,6	<100	1	\$14,628,450
Cámara de Oxidación	28,6[MW]	a=632900	0,6	2000	1	\$4,745,861
Turbina de expansión	18,4[MW]	a=182600	0,5561	1120	15	\$13,732,905
Recuperador	1486667[W/K]	a=49,45	0,7544	650	3,141	\$6,838,303
Condensador	1175000[W/K]	a=32,88	0,75	120	1	\$1,172,787
Compresor recirculación CO ₂	6,9[MW]	a=1230000	0,3992	<100	1	\$2,656,336
Compresor Combustible	1[MW]	a=1230000	0,3992	<100	1	\$1,230,000
TOTAL						\$45,004,642

En la tabla 8 se establece un valor de f_T para la turbina de expansión equivalente a 15 ya que la temperatura máxima supera los límites de materiales convencionales, por lo que es necesario adaptar el costo considerando sistemas de refrigeración y materiales cerámicos (Weiland et al., 2019). Cabe destacar que ambos modelos de escala son utilizados para realizar aproximaciones iniciales de costos de inversión ya que poseen un error superior al 30%. Para la presente investigación, los montos calculados sirven a nivel comparativo general para describir las diferencias entre ambos ciclos.

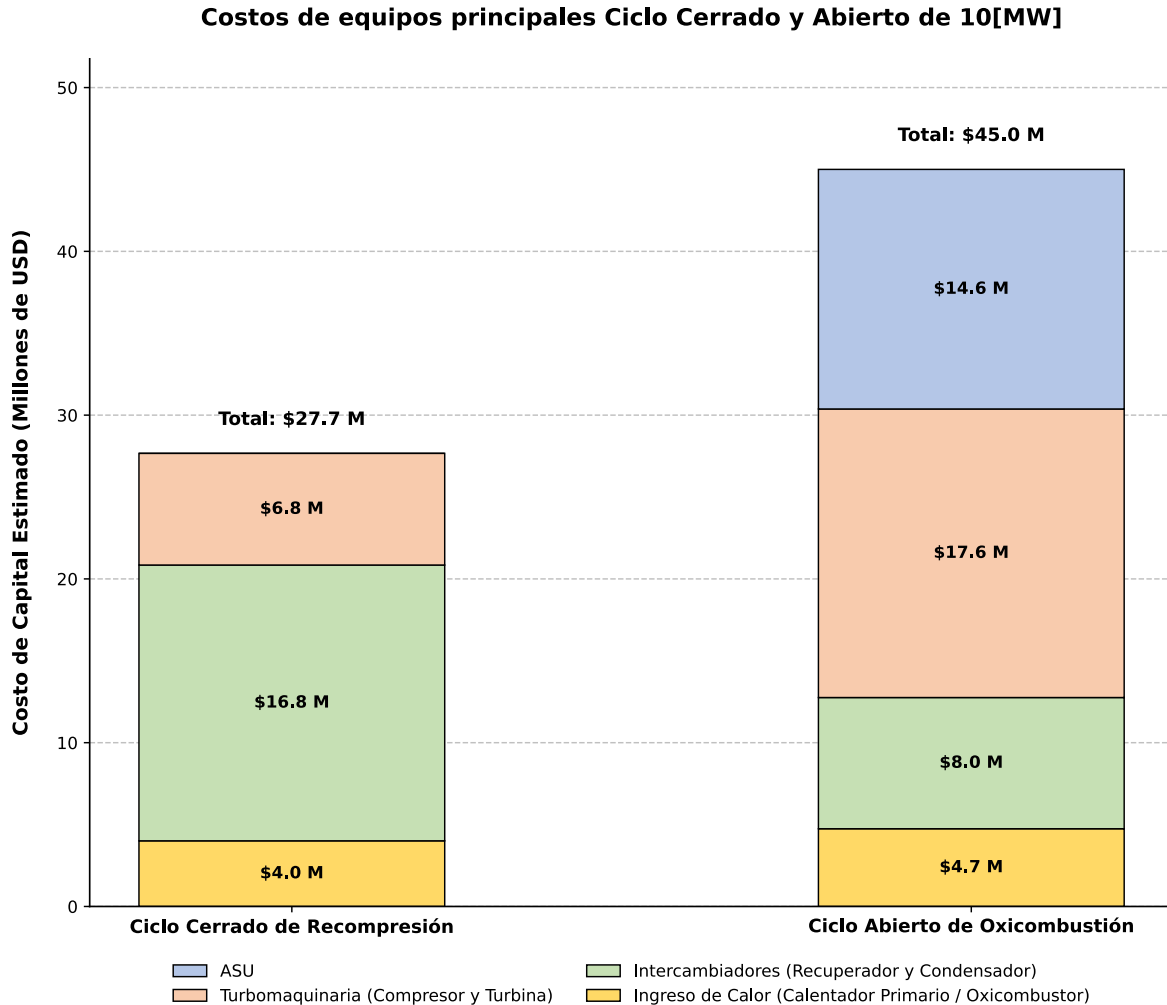


Figura 14: Comparativa de costos de equipos principales de ciclo cerrado y abierto de 10[MW]

A partir de la figura 14 se comprueba un costo en equipos considerablemente más alto para el caso de ciclo abierto debido a 2 factores principales:

1. Efecto ASU: Al tratarse de una combustión únicamente con oxígeno es necesario una unidad de separación de aire, este tipo de procesos son de mayor costo ya que requieren de una operación a presiones altas y temperaturas extremadamente bajas.
2. Efecto Turbina: La turbina en el ciclo abierto opera a una temperatura alta al recibir los gases directamente de la oxidación, por lo que es necesario adaptarla en términos de refrigeración y materialidad considerando recubrimientos cerámicos, lo que se traduce en un alza en el costo en comparación a la turbina de un ciclo cerrado que opera en condiciones de temperatura más estables.

La necesidad de adaptar y modificar equipos en el proceso es lo que mantiene al ciclo abierto de oxidación en una fase piloto (TRL 6) dificultando su implementación en una escala real, a diferencia del ciclo cerrado que se encuentra en una fase de desarrollo avanzada, lo que permite su implementación en una fase comercial. Contrario a lo anterior, una de las

ventajas del ciclo abierto es su conexión simplificada con un sistema de captura de CO₂, al tratarse de un nodo abierto, es posible conectar el fluido de trabajo a un sistema de captura de CO₂ como es el caso de los yacimientos agotados de petróleo, lo que reduce en gran medida su tiempo y dificultad de implementación.

De esta manera se define que un ciclo cerrado es una mejor opción en términos de costo de equipos y viabilidad técnica. Sin embargo, aspectos como la revalorización del producto final en el caso del ciclo abierto con la recuperación de petróleo pueden generar una diferencia en rentabilidad a largo plazo, logrando superar al ciclo cerrado en preferencia a pesar de su dificultad de implementación y elevada inversión inicial.

6.3. Comparación de simulador vs Aspen HYSYS

6.3.1. Configuración y flexibilidad

Una de las características destacables de las herramientas proporcionadas por Aspen HYSYS es la disponibilidad de una gran cantidad de paquetes termodinámicos aplicables según las características del proceso como puede ser el uso de sustancias orgánicas o procesos a altas temperaturas (AspenTech, 2019). Esto, aunque es una ventaja técnica al permitir simular distintos procesos, tiene una restricción a nivel de software al utilizar un enfoque de herencia jerárquica, donde un único paquete de propiedades global rige sobre secciones completas del diagrama de flujo, la rigidez estructural obliga a introducir bloques lógicos de transición y cortes artificiales en el proceso cada vez que se requiere evaluar fluidos con comportamientos distintos bajo ecuaciones de estado diferentes.

Por el contrario, considerando el simulador desarrollado, se propone una configuración estrictamente independiente, ya que la estructura del código se encuentra bajo una lógica orientada a objetos, cada corriente tiene la autonomía para consultar de manera dinámica librerías y rutinas específicas según su propia naturaleza física, en este caso diferenciando corrientes de compuestos puros o corrientes de mezclas. La característica modular no solo mantiene intacta la continuidad del diagrama de flujo, sino que aísla la complejidad termodinámica en el código, evitando discontinuidades y problemas de convergencia inherentes a los cambios de sección en el software de Aspen HYSYS.

6.3.2. Precisión y Robustez de cálculo

Dentro del grupo de paquetes termodinámicos disponibles en Aspen HYSYS, el más utilizado es el que incluye la ecuación de estado de Peng-Robinson ya que es una ecuación de estado cúbica que ofrece una alta eficiencia computacional y fiabilidad en equilibrios líquido-vapor generales, sin embargo, su simplicidad matemática es propensa a general niveles considerables de incertidumbre al predecir propiedades calóricas y densidades, específicamente en fases supercríticas como es el caso del ciclo de Brayton (FluidMech et al., 1973).

En contraste, la herramienta desarrollada utiliza un paquete termodinámico combinado, que incluye la relación a partir de la energía libre de Helmholtz para determinar la presión y temperatura. Aunque su simplicidad matemática es comparable al caso de Peng-Robinson, su inclusión de parámetros experimentales permite describir el comportamiento térmico y volumétrico de fluidos con un nivel de error menor en comparación.

Tabla 9: Incertidumbre reportada para Peng-Robinson y energía libre de Helmholtz

Propiedad	Aspen (Peng-Robinson)	Simulador (Energía libre de Helmholtz)	Referencia
Densidad en Fase Gaseosa	1-3%	<0,1%	Kunz & Wagner (2012); Span & Wagner (1996)
Densidad en Fase Líquida	5-12%	<0,2%	
Capacidad Calorífica (Cp,Cv)	3-5%	<1%	
Rango de Validez (P y T)	Extrapolación inestable en altas presiones	Ajustado a presiones extremas (>500[MPa])	

A partir de la tabla 9, se demuestra un nivel de precisión mayor de la relación a partir de la energía libre de Helmholtz usada para calcular propiedades termodinámicas, específicamente en condiciones supercríticas. Sin embargo, esto no demuestra estrictamente que la herramienta desarrollada entrega una mayor precisión de resultados ya que las herramientas que ofrece Aspen HYSYS permiten seleccionar otros paquetes termodinámicos que pueden ofrecer resultados con un nivel de precisión comparable o mayor que el caso del simulador, la ventaja radica en el nivel de configuración mencionada en el punto anterior, combinar múltiples paquetes termodinámicos según las condiciones del fluido permite adaptar el cálculo al contexto de un proceso, logrando resultados más robustos.

6.3.3. Tiempo de aprendizaje y desarrollo

La curva de aprendizaje y los tiempos de desarrollo presentan diferencias significativas según la perspectiva del usuario final y del desarrollador. El uso de Aspen HYSYS requiere de un aprendizaje previo exhaustivo donde el usuario debe comprender su arquitectura y selección de paquetes de fluidos a través de documentación o cursos especializados. Esto se traduce en una inversión de tiempo considerable antes de ejecutar una simulación. Por otro lado, un simulador desarrollado mediante IA centraliza la complejidad en su código, requiriendo del usuario final únicamente el conocimiento a nivel conceptual del proceso, lo que reduce drásticamente su tiempo de aprendizaje.

De forma inversa ocurre con el tiempo de desarrollo. En Aspen HYSYS, una persona con el entendimiento necesario del software puede construir y converger un diagrama de flujo en cuestión de horas o días dependiendo del caso. En contraste, la construcción de un simulador

propio asistido por IA requiere de un periodo de semanas o meses, margen de tiempo que incluye la iteración constante de requerimientos y la validación termodinámica para asegurar que el modelo entienda y respete las restricciones físicas del proceso. Sin embargo, esta alta inversión de tiempo de desarrollo se compensa en la fase de operación, la ejecución de una simulación por parte del usuario final ocurre en el orden de minutos gracias al diseño intuitivo, lo que optimiza la toma de decisiones frente a la rigidez de un software tradicional como Aspen HYSYS.

6.3.4. Costo y accesibilidad

Un indicador que perjudica el caso de Aspen es el costo de licencias, con opciones para uso corporativo y para uso académico que se encuentran por sobre los 1000 dólares. Para la construcción de un simulador, el uso de un entorno de desarrollo integrado es gratuito y el costo solamente se encuentra asociado al uso de inteligencia artificial, en comparación, el costo de una licencia de inteligencia artificial con asistencia de código no supera los 100 dólares.

A continuación, se presenta una tabla comparativa con el costo asociado para el uso de Aspen HYSYS y el costo de licencia de los modelos de IA más utilizados actualmente, cabe destacar que la información proporcionada fue extraída con fecha de mayo de 2026.

Tabla 10: Licencias y costos de Software/IA de simulación

Software/IA	Opción de uso gratuito	Licencia	Costo USD / Modelo de cobro
Google Gemini	Limitado	AI Plus	\$7,99 Mensual
		AI Pro	\$19,99 Mensual
		AI Ultra	\$99,99 Mensual
Anthropic Claude	Limitado	Pro	\$17,00 Mensual
		Max	\$100,00 Mensual
OpenAI ChatGPT	Limitado	Go	\$8,00 Mensual
		Plus	\$20,00 Mensual
		Pro	\$100,00 Mensual
Microsoft Copilot	Limitado	365 Personal	\$9,99 Mensual
		365 Family	\$12,99 Mensual
		365 Premium	\$19,99 Mensual
Aspen HYSYS	Solo a través de demo	Red	*Sujeta a Cotización
		Educativa	

Una característica clave que diferencia a Aspen HYSYS de las licencias de modelos de inteligencia artificial es su accesibilidad a nivel de usuario, ya que el proceso de adquisición de Aspen HYSYS incluye una cotización según el uso específico del software y es un proceso estrictamente destinado a empresas (modelo “negocio-a-negocio” o B2B), en comparación a

las licencias de modelos de IA que cuentan con un acceso gratuito limitado y con la disponibilidad de adquirir licencias a nivel de usuario.

Respecto al costo, es evidente que el costo de Aspen HYSYS es considerablemente mayor precisamente por su modelo de negocio de licencias destinado a empresas. Desde la perspectiva de los modelos de IA, todos mantienen una gama de opciones con precios y prestaciones similares, la diferencia clave se encuentra en el caso de uso. Google y Microsoft se enfocan en la integración con su ecosistema de aplicaciones y servicios, mientras que Anthropic y OpenAI se centran en modelos que abordan tareas de mayor razonamiento como el uso en programación.

En base a lo anterior se demuestra que, a nivel de costo y accesibilidad, la IA supera a un simulador comercial como Aspen HYSYS, precisamente por su disponibilidad de forma gratuita a nivel usuario y por su opción de licencias a precios competitivos destinadas a usos más intensivos. Cabe mencionar que el desarrollo de la funcionalidad base y estética del simulador utilizado en el estudio del ciclo de Brayton fue realizado a través de la alternativa gratuita que ofrece Anthropic a través de Claude, esto demuestra que el uso de licencias en el caso de la IA no es mandatorio para desarrollar herramientas de simulación ya que su caso de uso se encuentra en proyectos de mayor envergadura (desarrollo de aplicaciones y manejo de bases de datos).

7. Conclusión

A través de los resultados obtenidos a partir del simulador desarrollado utilizando inteligencia artificial, se identifica que la temperatura generada en la combustión del ciclo forma parte de una variable limitante en el funcionamiento del proceso, la restricción de operación a temperaturas menores a 2000 [°C] establece un límite operacional clave asociado a la resistencia de materiales de los equipos. De forma similar ocurre con la presión utilizada en la compresión y en la expansión del fluido de trabajo, la presión de compresión por sobre la presión de saturación del dióxido de carbono establece el punto de partida para la presión en la turbina con el objetivo de mantener la razón de presión que maximice la eficiencia del ciclo. Respecto al análisis de sensibilidad de la fracción de agua en la turbina, se comprueba el efecto negativo de la fracción de agua sobre la eficiencia del ciclo, además, al incluir la restricción térmica proveniente de la combustión, se establece que, en condiciones óptimas de operación, la fracción de agua no debe superar un valor de 0,12[-], esto a través de una fracción de recirculación de SC-CO₂ por sobre 0,9[-].

Con la adición de un sistema de captura y almacenamiento de carbono en yacimientos agotados de petróleo, se determina que un ciclo de Brayton abierto ofrece una alternativa de mayor rentabilidad y menor impacto ambiental ya que mediante la recuperación mejorada de petróleo se reutilizan los productos provenientes de la combustión, reduciendo el impacto ambiental y generando un producto secundario adicional a la energía generada del proceso.

En base al análisis comparativo entre un ciclo abierto de oxidación y un ciclo cerrado de recompresión se establece que el ciclo cerrado alcanza una eficiencia mayor gracias al efecto de la división de la carga energética en múltiples compresores, sin embargo, para alcanzar la misma potencia generada, requiere de tres veces la cantidad de combustible que un ciclo abierto, por lo que la diferencia en rendimiento se ve compensada por el menor uso de combustible. Además, el ciclo cerrado requiere de una menor inversión principal ya que no considera equipos como la unidad de separación de aire que elevan sustancialmente el costo de un ciclo abierto de oxidación, sin embargo, al incluir un proceso de recuperación de petróleo, el ciclo abierto potencialmente puede obtener un mayor retorno de la inversión.

En relación con la evaluación de las herramientas computacionales, el análisis comparativo demuestra que la baja disponibilidad y alto costo de una licencia comercial de Aspen HYSYS no es justificable frente a las alternativas de código abierto. Se evidencia que, mediante la integración de asistentes de IA, es factible construir un simulador personalizado y de alta precisión sin la necesidad de poseer conocimientos avanzados en programación. El desarrollo de esta herramienta revela que una estructuración conceptual clara del proceso termodinámico es suficiente para generar un código funcional que cumpla con el objetivo deseado, superando además la rigidez estructural de los paquetes comerciales al permitir una adaptación dinámica de los modelos físicos.

8. Referencias

- Ahn, Y., Bae, S. J., Kim, M., Cho, S. K., Baik, S., Lee, J. I., & Cha, J. E. (2015). Review of supercritical CO₂ power cycle technology and current status of research and development. In *Nuclear Engineering and Technology* (Vol. 47, Number 6, pp. 647–661). Korean Nuclear Society. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.06.009>
- Allam, R., Martin, S., Forrest, B., Fetvedt, J., Lu, X., Freed, D., Brown, G. W., Sasaki, T., Itoh, M., & Manning, J. (2017). Demonstration of the Allam Cycle: An Update on the Development Status of a High Efficiency Supercritical Carbon Dioxide Power Process Employing Full Carbon Capture. *Energy Procedia*, 114, 5948–5966. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1731>
- Anthropic. (2025). *Claude Code Docs*. <https://code.claude.com/docs/en/overview>
- AspenTech. (2019). *Aspen HYSYS Unit Operations Reference Guide*. <http://www.aspentech.com>
- Bachu, S. (2008). CO₂ storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 34, Number 2, pp. 254–273). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.10.001>
- Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., & Lemort, V. (2014a). Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(6), 2498–2508. <https://doi.org/10.1021/ie4033999>
- Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., & Lemort, V. (2014b). Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(6), 2498–2508. <https://doi.org/10.1021/ie4033999>
- Carbfix hf. (2026). *Carbfix: We turn CO₂ into stone*. <https://www.carbfix.com/>
- Chen, S., Zhou, N., & Xiang, W. (2024). Pressurized oxy-fuel combustion with sCO₂ cycle and ORC for power production and carbon capture. *Case Studies in Thermal Engineering*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104697>
- Clark, J. A., & contributors. (2026). *Pillow: Python Imaging Library (Fork)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17362416>
- Dillon, H. E., & Penoncello, S. G. (2004). A Fundamental Equation for Calculation of the Thermodynamic Properties of Ethanol 1. In *International Journal of Thermophysics* (Vol. 25, Number 2).

- Energy Statistics Data Browser, & International Energy Agency. (2025, March 25). *Fossil fuel energy consumption (% of total)*. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.COMM.FO.ZS>
- FluidMech, J., Berg, H. J., D, R. I., Co, J., Sci, I., K, L. V, Peng, D.-Y., & Robinson, D. B. (1973). A New Two-Constant Equation of State. In *Ind. fng. Chem.. Fundam* (Vol. 19).
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J. F., Wiebe, M., Peterson, P., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. In *Nature* (Vol. 585, Number 7825, pp. 357–362). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Holloway, S. (2001). *STORAGE OF FOSSIL FUEL-DERIVED CARBON DIOXIDE BENEATH THE SURFACE OF THE EARTH*. www.annualreviews.org
- Inc., P. T. (2015). *Collaborative data science*. Plotly Technologies Inc. <https://plot.ly>
- Kunz, O., & Wagner, W. (2012). The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: An expansion of GERG-2004. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 57(11), 3032–3091. <https://doi.org/10.1021/je300655b>
- Leachman, J. W., Jacobsen, R. T., Penoncello, S. G., & Lemmon, E. W. (2009). Fundamental equations of state for parahydrogen, normal hydrogen, and orthohydrogen. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 38(3), 721–748. <https://doi.org/10.1063/1.3160306>
- Lemmon, E. W., McLinden, M. O., & Wagner, W. (2009). Thermodynamic properties of propane. III. A reference equation of state for temperatures from the melting line to 650 K and pressures up to 1000 MPa. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 54(12), 3141–3180. <https://doi.org/10.1021/je900217v>
- Lemmon, E. W., & Span, R. (2006). Short fundamental equations of state for 20 industrial fluids. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 51(3), 785–850. <https://doi.org/10.1021/je050186n>
- Li, B., Sun, S., Zhang, L., Feng, D., Zhao, Y., Wang, P., Wu, J., Qiu, P., Zhang, F., & Qin, Y. (2021). System modification and thermal efficiency study on the semi-closed cycle of supercritical carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114272>
- Liese, E., Albright, J., & Zitney, S. A. (2020). Startup, shutdown, and load-following simulations of a 10 MWe supercritical CO2 recompression closed Brayton cycle. *Applied Energy*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115628>

- Liu, L., Yang, Q., & Cui, G. (2020). Supercritical carbon dioxide(S-co₂) power cycle for waste heat recovery: A review from thermodynamic perspective. In *Processes* (Vol. 8, Number 11, pp. 1–18). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pr8111461>
- Mckinney, W. (2010). *Data Structures for Statistical Computing in Python*.
- Metz, B., Davidson, O., & de Coninck, H. (2005). *CARBON DIOXIDE CAPTURE AND STORAGE*.
- Miao, Z., Tian, M., Wang, C., & Xu, J. (2025). Thermodynamic analysis of a novel high-efficiency coal-based sCO₂ power cycle combining semi-closed oxy-combustion cycle with sCO₂ Brayton cycle. *Energy*, 334. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137659>
- Molière, M., Privat, R., Jaubert, J. N., & Geiger, F. (2024). Supercritical CO₂ Power Technology: Strengths but Challenges. *Energies*, 17(5). <https://doi.org/10.3390/en17051129>
- NETL. (2017). *Supercritical CO₂ Power Cycles*. <https://www.netl.doe.gov/carbon-management/turbines/sco2>
- NETL. (2019). *QUALITY GUIDELINES FOR ENERGY SYSTEM STUDIES Capital Cost Scaling Methodology: Revision 3 Reports and Prior*. www.netl.doe.gov
- NIST. (2025). *Chemistry WebBook, SRD 69*.
- Rogalev, N., Rogalev, A., Kindra, V., Zlyvko, O., & Bryzgunov, P. (2022). Review of Closed SCO₂ and Semi-Closed Oxy–Fuel Combustion Power Cycles for Multi-Scale Power Generation in Terms of Energy, Ecology and Economic Efficiency. In *Energies* (Vol. 15, Number 23). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15239226>
- Sadkin, I. S., & Shchinnikov, P. A. (2025). Influence of the Proportion of the Working Fluid Renewal on Semi-closed Oxy-Fuel sCO₂ Power Cycles Efficiency Indicators. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50(7), 4753–4769. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09286-x>
- Schmidt, R., & Wagner, W. (1985). A NEW FORM OF THE EQUATION OF STATE FOR PURE SUBSTANCES AND ITS APPLICATION TO OXYGEN. In *Fluid Phase Equilibria* (Vol. 19). Elsevier Science Publishers B.V.
- Setzmann, U., & Wagner, W. (n.d.). *A New Equation of State and Tables of Thermodynamic Properties for Methane Covering the Range from the Melting Line to 625 K at Pressures up to 1000 MPa* 3. Retrieved http://jpcrd.aip.org/about/rights_and_permissions
- Span, R., & Wagner, W. (1996). *A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa*. http://jpcrd.aip.org/about/rights_and_permissions

- Spycher, N., & Pruess, K. (2005). CO₂-H₂O mixtures in the geological sequestration of CO₂. II. Partitioning in chloride brines at 12-100°C and up to 600 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(13), 3309–3320. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.01.015>
- Stearns, N. C., Roy, R., Schooff, B., Chiodo, A., Fry, A., & Iverson, B. D. (2025). Integration of sCO₂ Brayton Cycles With Carbon Capture Systems. *Journal of Energy Resources Technology, Part B: Subsurface Energy and Carbon Capture*, 1(5). <https://doi.org/10.1115/1.4068772>
- Streamlit Team. (2026). *Streamlit: The fastest way to build and share data apps*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18421864>
- Tamilarasan, S. K., Jose, J., Boopalan, V., Chen, F., Arumugam, S. K., Ramachandran, J. C., Parthasarathy, R. K., Taler, D., Sobota, T., & Taler, J. (2024). Recent Developments in Supercritical CO₂-Based Sustainable Power Generation Technologies. In *Energies* (Vol. 17, Number 16). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en17164019>
- Tiesinga, E., Mohr, P. J., Newell, D. B., & Taylor, B. N. (2021). Codata recommended values of the fundamental physical constants: 2018. *Reviews of Modern Physics*, 93(2). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.025010>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., ... Vázquez-Baeza, Y. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Wagner, W., & Pruß, A. (2002). *The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use*. <http://link.aip.org/link/JPCRBU/v31/i2/p387/s1>
- Weiland, N. T., Lance, B. W., & Pidaparti, S. R. (2019, June 17). sCO₂ Power Cycle Component Cost Correlations From DOE Data Spanning Multiple Scales and Applications. *Volume 9: Oil and Gas Applications; Supercritical CO₂ Power Cycles; Wind Energy*. <https://doi.org/10.1115/GT2019-90493>
- Weiss, F. G., & Bouallou, C. (2024). Supercritical Carbon Dioxide Power Cycles with Oxy-Combustion Capture: Towards a New Improved Cycle Layout for Energy Production. *Chemical Engineering Transactions*, 114, 145–150. <https://doi.org/10.3303/CET24114025>
- White, M. T., Bianchi, G., Chai, L., Tassou, S. A., & Sayma, A. I. (2021). Review of supercritical CO₂ technologies and systems for power generation. In *Applied Thermal*

Engineering (Vol. 185). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116447>

- Yang, Y., Shi, L., Yao, Y., Zhang, Y., He, J., Tian, H., Pei, G., & Shu, G. (2024). Supercritical CO₂ Brayton cycle for space exploration: New perspectives base on power density analysis. *Energy*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133772>
- Zhu, Q. (2017). Innovative power generation systems using supercritical CO₂ cycles. In *Clean Energy* (Vol. 1, Number 1, pp. 68–79). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/ce/zkx003>

9. Anexos

Tabla 11: Propiedades críticas de dióxido de carbono

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Temperatura crítica	T_c	304,13	K	(Tiesinga et al., 2021)
Presión crítica	P_c	7,377	MPa	(Span & Wagner, 1996)
Factor acéntrico	ωCO_2	0.2236	—	
Masa molar	$MMCO_2$	44.01	$\frac{g}{mol}$	

Tabla 12: Propiedades críticas del agua

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Temperatura crítica	T_c	647,10	K	(Wagner & Pruß, 2002)
Presión crítica	P_c	22,064	MPa	
Factor acéntrico	ωCO_2	0.3443	—	
Masa molar	MMH_2O	18,02	$\frac{g}{mol}$	

Tabla 13: Propiedades críticas del metano

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Temperatura crítica	T_c	190,56	K	(Setzmann & Wagner, n.d.)
Presión crítica	P_c	4,599	MPa	
Factor acéntrico	ωCO_2	0,0115	—	
Masa molar	$MMCH_4$	16,04	$\frac{g}{mol}$	

Tabla 14: Propiedades críticas del oxígeno

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Temperatura crítica	T_c	154,58	K	(Schmidt & Wagner, 1985)
Presión crítica	P_c	5,043	MPa	
Factor acéntrico	ωCO_2	0,0222	—	
Masa molar	MMO_2	32,00	$\frac{g}{mol}$	

Tabla 15: Propiedades críticas del monóxido de carbono

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Temperatura crítica	T_c	132,86	K	(Lemmon & Span, 2006)
Presión crítica	P_c	3,494	MPa	
Factor acéntrico	ωCO_2	0,0497	—	
Masa molar	$MMCO$	28,01	$\frac{g}{mol}$	

Tabla 16: Propiedades críticas del hidrógeno

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Temperatura crítica	T_c	33,19	K	(Leachman et al., 2009)
Presión crítica	P_c	1,313	MPa	
Factor acéntrico	ωCO_2	-0,2160	—	
Masa molar	MMH_2	2,02	$\frac{g}{mol}$	

Tabla 17: Propiedades críticas del etano

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Temperatura crítica	T_c	305,32	K	(NIST, 2025)
Presión crítica	P_c	4,872	MPa	
Factor acéntrico	ωCO_2	0,0995	—	
Masa molar	MMC_2H_6	30,07	$\frac{g}{mol}$	

Tabla 18: Propiedades críticas del propano

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Temperatura crítica	T_c	369,83	K	(Lemmon et al., 2009)
Presión crítica	P_c	4,248	MPa	
Factor acéntrico	ωCO_2	0.1523	—	
Masa molar	MMC_3H_8	44,10	$\frac{g}{mol}$	

Tabla 19: Propiedades críticas del etanol

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Temperatura crítica	T_c	513,92	K	(Dillon & Penoncello, 2004)
Presión crítica	P_c	6,148	MPa	
Factor acéntrico	ωCO_2	0,6450	—	
Masa molar	MMC_2H_5OH	46,07	$\frac{g}{mol}$	

Tabla 20: Poder calorífico inferior (LHV) de combustibles

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
LHV Gas natural	LHV_{GN}	802	$\frac{kJ}{mol}$	(NIST, 2025)
LHV Propano	$LHV_{C_3H_8}$	2,043		
LHV Etanol	$LHV_{C_2H_5OH}$	1,277		



Figura 15: Acceso a simulador de ciclo de Brayton abierto (oxicombustión)