



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

**FACTIBILIDAD DE COGENERACIÓN ENERGÉTICA PARA  
OPTIMIZAR EL USO DE RESIDUOS TÉRMICOS MECHERO  
REFINERÍA DE ESMERALDAS**

**AUTORA**

**Salazar Estupiñán Yuli Jomaira**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Previo a la obtención del grado académico en  
MAGÍSTER EN PETRÓLEOS**

**TUTOR**

**Ing. Salas Barzola Xavier Alexander PhD.**

**Santa Elena, Ecuador**

**Año 2025**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**Econ. Roxana Álvarez Acosta, PhD  
COORDINADORA (E) DEL  
PROGRAMA**

---

**Ing. Alexander Salas Barzola, PhD.  
TUTOR**

---

**Ing. Marllelis Gutiérrez Hiestroza PhD.  
DOCENTE ESPECIALISTA 1**

---

**Ing. José Villegas Salabarría, PhD  
DOCENTE ESPECIALISTA 2**

---

**AB. María Rivera González, Mgtr.  
SECRETARIA GENERAL UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por Yuli Jomaira Salazar Estupiñán, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Petróleos.

**TUTOR**

---

**Ing. Salas Barzola, Xavier Alexander PhD.**

**28 días del mes de agosto del año 2025**



**UPSE**

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, Yuli Jomaira Salazar Estupiñán**

**DECLARO QUE:**

El trabajo de Titulación, **FACTIBILIDAD DE COGENERACIÓN ENERGÉTICA PARA OPTIMIZAR EL USO DE RESIDUOS TÉRMICOS MECHERO REFINERÍA DE ESMERALDAS** previo a la obtención del título en Magister en Petróleos, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, a los 28 días del mes de agosto del año 2025

**LA AUTORA**

---

**Ing. Yuli Jomaira Salazar Estupiñán**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO**

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado (Titulo del ensayo), presentado por el estudiante, Yuli Jomaira Salazar Estupiñán fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al **10%**, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

 CERTIFICADO DE ANÁLISIS  
magister

**SALAZAR YULI JOMAIRA-  
COMPILATIO**

**10%**  
Textos  
sospechosos

**2% Similitudes**  
0% similitudes entre comillas  
< 1% entre las fuentes  
mencionadas

**5% Idiomas no reconocidos (ignorado)**

**7% Textos potencialmente generados  
por la IA**

Nombre del documento: SALAZAR YULI JOMAIRA- COMPILATIO.docx	Depositante: XAVIER ALEXANDER SALAS BARZOLA	Número de palabras: 14.027
ID del documento: 5c2b84f40df385553b170b58b4418d82fa7f416d	Fecha de depósito: 29/8/2025	Número de caracteres: 100.044
Tamaño del documento original: 16,63 MB	Tipo de carga: interfaz	
	fecha de fin de análisis: 29/8/2025	

**TUTOR**

---

**Ing. Salas Barzola, Xavier Alexander Ph.D.**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**AUTORIZACIÓN**

**Yo, Yuli Jomaira Salazar Estupiñán**

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de informe de investigación con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

Santa Elena, a los 28 días del mes de agosto del año 202

**EL AUTOR**

---

**Ing. Yuli Jomaira Salazar Estupiñán**

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la fortaleza y sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante.

A mi familia, por su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y su paciencia en cada momento de este camino.

A mi tutor, Ing. Xavier Salas por su guía, exigencia académica y orientación constante, que fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos y compañeros, por compartir conocimientos, motivarme y acompañarme en los momentos más difíciles.

A la Universidad Estatal Península de Santa Elena y todos los docentes del programa de Maestría en Petróleos, por brindarme las herramientas y el conocimiento que me permitieron realizar este trabajo.

Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera aportaron su tiempo, conocimientos y apoyo, mis más sinceros agradecimientos.

*Yuli Salazar*

## DEDICATORIA

A mis padres, por enseñarme el esfuerzo, la perseverancia y por creer siempre en mí.

A mi familia, mi motor, mi refugio, que siempre me acompañaron con amor.

A mis seres queridos que, aunque ausentes, siempre iluminan mis días con su recuerdo y amor eterno.

A mi amigo José, por estar siempre y por la sincera amistad que siempre me ha acompañado.

Y a todos aquellos que sueñan y trabajan sin descanso por lograr sus objetivos, esperando que nunca pierdan la fe en sí mismos.

*Yuli Salazar*

## INDICE GENERAL

<b>TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b> .....	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO.....	V
AUTORIZACIÓN.....	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
DEDICATORIA.....	VIII
INDICE GENERAL.....	IX
INDICE DE FIGURAS.....	XII
INDICE DE TABLAS.....	XIV
INDICE DE ECUACIONES.....	XV
RESUMEN.....	XVI
ABSTARCT.....	XVII
INTRODUCCION.....	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	4
1.1. Desarrollo teórico y conceptual.....	4
1.1.1. Combustión.....	4
1.1.2. Gases residuales de refinería.....	5
• Gases residuales amargos (GR).....	5
• Gases residuales dulce.....	6
1.1.3. Cromatografía de gases.....	8
1.1.4. Parámetros energéticos clave.....	9
• Eficiencia energética.....	9
• Balance térmico.....	10
• Rendimiento eléctrico.....	10
1.1.5. Cogeneración energética.....	11
• Tipos de sistemas de cogeneración.....	13
1.1.6. Ciclo Rankine.....	14
• Intercambiadores de calor.....	15
• Turbina de vapor.....	15
• Generador eléctrico.....	16

• Condensador .....	17
• Bomba de recirculación .....	17
1.2. Revisión de literatura.....	18
1.3. Situación energética y uso de cogeneración en Ecuador .....	22
1.3.1. Proyecto Kioto / Efecto Invernadero, energías renovables, bonos de carbono .....	22
1.3.2. Factibilidad energética del gas residual para cogeneración.....	23
1.3.3. Situación de la cogeneración en Ecuador y en el mundo .....	25
• Refinación de hidrocarburos en Ecuador.....	26
• Refinería Estatal Esmeraldas .....	27
• Mecheros o TEAS (Flare).....	28
• Estudios ambientales en la Refinería de Esmeraldas.....	29
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA .....	32
2.1. Contexto de la investigación.....	32
2.2. Diseño y alcance de la investigación .....	33
2.3. Tipo y métodos de investigación .....	34
2.4. Población y muestra .....	35
2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	36
2.5.1. Caracterización de la energía térmica residual del TEA Mechero .....	37
2.5.2. Análisis de tecnologías de cogeneración .....	38
2.5.3. Simulación del sistema en MATLAB.....	39
2.5.4. Evaluación técnica y ambiental .....	41
2.6. Fiabilidad y validez de las herramientas utilizadas para la recopilación de información.....	42
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	44
3.1. Caracterización energética del gas residual del TEA 2001 .....	44
3.2. Análisis comparativo de tecnologías de cogeneración aplicables .....	46
3.2.1. Enfoque de selección tecnológica basado en la norma ISO 50001:2018 .....	46
3.3 Evaluación del sistema integrado de cogeneración mediante simulación en MATLAB.....	53
3.3.1. Condiciones de operación para la simulación .....	53
3.3.2. Descripción del modelo en MATLAB/Simulink.....	54
3.4. Estimación de costos de implementación .....	62
CAPITULO 4. ....	66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	66

REFERENCIAS .....	69
ANEXOS .....	75

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> <i>Triángulo de elementos de la combustión</i> .....	4
<b>Figura 2.</b> <i>Gases residuales</i> .....	5
<b>Figura 3.</b> <i>Componentes y propiedades del gas amargo</i> .....	6
<b>Figura 4.</b> <i>Proceso de endulzamiento</i> .....	6
<b>Figura 5.</b> <i>Típico cromatógrafo de gases</i> .....	8
<b>Figura 6.</b> <i>Importancia de la eficiencia energética</i> .....	9
<b>Figura 7.</b> <i>Balance térmico</i> .....	10
<b>Figura 8.</b> <i>Eficiencia y rendimiento en equipos térmicos</i> .....	11
<b>Figura 9.</b> <i>Esquema de un sistema de cogeneración industrial</i> .....	12
<b>Figura 10.</b> <i>Principales beneficios de la cogeneración</i> .....	12
<b>Figura 11.</b> <i>Tipos de sistemas de cogeneración</i> .....	13
<b>Figura 12.</b> <i>Esquema de un ciclo Rankine</i> .....	14
<b>Figura 13.</b> <i>Diagrama del proceso de un intercambiador de calor</i> .....	15
<b>Figura 14.</b> <i>Turbina de vapor</i> .....	16
<b>Figura 15.</b> <i>Diagrama eléctrico de un generador</i> .....	16
<b>Figura 16.</b> <i>Diagrama del funcionamiento de un condensador</i> .....	17
<b>Figura 17.</b> <i>Partes de una bomba de recirculación</i> .....	18
<b>Figura 18.</b> <i>Tea RLL funcional con flujo previo en tanque blowdown</i> .....	19
<b>Figura 19.</b> <i>Simulación de combustión de gases de la TEA RLL</i> .....	19
<b>Figura 20.</b> <i>Tasa interna de retorno</i> .....	20
<b>Figura 21.</b> <i>Tiempo de recuperación de la inversión</i> .....	20
<b>Figura 22.</b> <i>Esquema conceptual para mitigar efecto invernadero</i> .....	22
<b>Figura 23.</b> <i>Normativa legal para cogeneración y eficiencia energética</i> .....	23
<b>Figura 24.</b> <i>Planta de cogeneración del Ingenio San Carlos, Ecuador</i> .....	25
<b>Figura 25.</b> <i>Proceso de refinación del petróleo</i> .....	26
<b>Figura 26.</b> <i>Ubicación refinería de Esmeraldas</i> .....	27
<b>Figura 27.</b> <i>Mapa de procesos de la refinería de Esmeraldas</i> .....	28
<b>Figura 28.</b> <i>Sistema típico de TEA</i> .....	29
<b>Figura 29.</b> <i>Impacto de la contaminación por líquidos de la Refinería de Esmeraldas</i> .....	30
<b>Figura 30.</b> <i>Impacto de la calidad del aire de la Refinería de Esmeraldas</i> .....	31
<b>Figura 31.</b> <i>Objetivos de la investigación</i> .....	32
<b>Figura 32.</b> <i>Alcance de la investigación</i> .....	33
<b>Figura 33.</b> <i>Enfoques de la investigación</i> .....	34
<b>Figura 34.</b> <i>Etapas del procedimiento metodológico</i> .....	35

<b>Figura 35.</b> <i>Técnicas e instrumentos de recolección de datos</i> .....	36
<b>Figura 36.</b> <i>Metodología para la caracterización de energía térmica</i> .....	37
<b>Figura 37.</b> <i>Análisis de tecnologías de cogeneración</i> .....	38
<b>Figura 38.</b> <i>Metodología aplicada en la simulación</i> .....	39
<b>Figura 39.</b> <i>Esquema del sistema de cogeneración</i> .....	40
<b>Figura 40.</b> <i>Beneficios de la propuesta</i> .....	41
<b>Figura 41.</b> <i>Metodología aplicada en la evaluación técnica y ambiental</i> .....	42
<b>Figura 42.</b> <i>Resumen del capítulo 2</i> .....	43
<b>Figura 43.</b> <i>Ciclo PHVA aplicado a la investigación</i> .....	47
<b>Figura 44.</b> <i>Simulación completa</i> .....	55
<b>Figura 45.</b> <i>Entrada en Simulink (calor disponible y entalpías)</i> .....	56
<b>Figura 46.</b> <i>Turbina y generador en Simulink</i> .....	57
<b>Figura 47.</b> <i>Condensador y cálculo de eficiencias en Simulink.</i> .....	59
<b>Figura 48.</b> <i>Resumen del capítulo 3</i> .....	65
<b>Figura 49.</b> <i>Programación para emisiones de CO2</i> .....	75
<b>Figura 50.</b> <i>Tambor separador de líquidos (Knockout Drum) Y-V2001 de la línea de flare TEA 2001</i> .....	76
<b>Figura 51.</b> <i>Mecheros TEA 2001, 2002 y 2003 de la Refinería de Esmeraldas</i> .....	76

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Caracterización fisicoquímica TEA 2001</i> .....	7
<b>Tabla 2.</b> <i>FODA de la cogeneración</i> .....	21
<b>Tabla 3.</b> <i>Variedades de Crudos, Grado API, precio 2006/2007 (barril-dólar)</i> .....	24
<b>Tabla 4.</b> <i>Resumen de cálculos obtenidos</i> .....	45
<b>Tabla 5.</b> <i>Tecnologías seleccionadas para el sistema de cogeneración</i> .....	48
<b>Tabla 6.</b> <i>Datos tomados para la simulación</i> .....	53
<b>Tabla 7.</b> <i>Datos tomados para la simulación</i> .....	61
<b>Tabla 8.</b> <i>Resultados obtenidos en la simulación</i> .....	61
<b>Tabla 9.</b> <i>Costos de los componentes de cogeneración</i> .....	62
<b>Tabla 10.</b> <i>Datos para el cálculo de emisiones</i> .....	64

## INDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1.</b> <i>Fracción molar en fracción masica</i> .....	37
<b>Ecuación 2.</b> <i>Contribución energética</i> .....	38
<b>Ecuación 3.</b> <i>Energía térmica disponible</i> .....	38
<b>Ecuación 4.</b> <i>ROI</i> .....	42
<b>Ecuación 5.</b> <i>Calor en el generador de vapor</i> .....	56
<b>Ecuación 6.</b> <i>Diferencia de entalpia de entrada</i> .....	57
<b>Ecuación 7.</b> <i>Diferencia de entalpia isentrópica (turbina)</i> .....	57
<b>Ecuación 8.</b> <i>Trabajo específico del vapor</i> .....	58
<b>Ecuación 9.</b> <i>Potencia de la turbina</i> .....	58
<b>Ecuación 10.</b> <i>Potencia eléctrica generada</i> .....	58
<b>Ecuación 11.</b> <i>Cálculo de entalpia de salida de la turbina</i> .....	59
<b>Ecuación 12.</b> <i>Calor útil recuperado en el condensador</i> .....	59
<b>Ecuación 13.</b> <i>Eficiencia eléctrica del sistema</i> .....	60
<b>Ecuación 14.</b> <i>Eficiencia global de cogeneración</i> .....	60
<b>Ecuación 15.</b> <i>Energía eléctrica anual</i> .....	63
<b>Ecuación 16.</b> <i>Ahorro económico</i> .....	63
<b>Ecuación 17.</b> <i>Beneficio anual</i> .....	63
<b>Ecuación 18.</b> <i>Emisiones de CO2</i> .....	64
<b>Ecuación 19.</b> <i>Emisiones evitadas</i> .....	64

## RESUMEN

### **FACTIBILIDAD DE COGENERACIÓN ENERGÉTICA PARA OPTIMIZAR EL USO DE RESIDUOS TÉRMICOS MECHERO REFINERÍA DE ESMERALDAS.**

Este estudio analiza si se puede aprovechar el gas que actualmente se quema al aire libre en el TEA 2001 de la Refinería de Esmeraldas. Actualmente esa quema libera contaminantes y desperdicia energía útil. La propuesta es diseñar un sistema de cogeneración que recupere el poder calorífico de esos gases para producir a la vez, electricidad y calor, y así reducir el consumo interno de la planta.

Para evaluarlo se combinaron la revisión de documentos y simulaciones en MATLAB, las cuales mostraron que el gas tiene un poder calorífico de 49,22 MJ/kg.

Para esto, se propuso la implementación de un intercambiador de calor tipo carcasa y tubos, acoplado a una turbina de contrapresión y un generador síncrono, con lo cual se estima una generación de 1,5 MW eléctricos y una eficiencia global del 84%.

El análisis económico reveló una inversión de \$ 508350,40 USD con retorno en menos de un año y una reducción potencial de 38,000 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>.

Los resultados obtenidos validan la factibilidad del aprovechamiento del gas residual, demostrando que gases considerados de desecho pueden ser transformados en una fuente energética eficiente y sostenible.

Se concluye que la cogeneración no solo mejora la eficiencia operativa de la refinería, sino que también contribuye significativamente a la reducción de su huella ambiental, mejorando así la calidad del aire y de vida de las poblaciones cercanas a esta.

#### **Palabras claves:**

Refinería Esmeraldas, cogeneración, gas residual, intercambiador de calor.

## ABSTARCT

### **FEASIBILITY OF ENERGY COGENERATION TO OPTIMIZE THE USE OF THERMAL WASTE AT THE ESMERALDAS REFINERY FLARE.**

This study analyzes whether the gas currently burned in the open air at the Esmeraldas Refinery's TEA2001 can be used. Currently, these burning releases pollutants and wastes useful energy. The proposal is to design a cogeneration system that recovers the calorific value of these gases to simultaneously produce electricity and heat, thus reducing the plant's internal consumption.

To evaluate this, a combination of document review and MATLAB simulations showed that the gas has a calorific value of 49.22 MJ/kg.

To this end, the implementation of a shell-and-tube heat exchanger coupled with a backpressure turbine and a synchronous generator was proposed, with an estimated generation of 1.5 MW of electricity and an overall efficiency of 84%.

The economic analysis revealed an investment of \$508,350.40 USD with a payback in less than one year and a potential reduction of 38,000 tons of CO<sub>2</sub> per year.

The results obtained validate the feasibility of utilizing waste gas, demonstrating that gases considered waste can be transformed into an efficient and sustainable energy source.

It is concluded that cogeneration not only improves the refinery's operational efficiency but also contributes significantly to reducing its environmental footprint, thereby improving air quality and the quality of life of nearby communities.

#### **Keywords:**

Esmeraldas Refinery cogeneration, waste gas, heat exchanger.

## INTRODUCCION

El petróleo ha sido una de las principales fuentes de energía más importantes que promueve el desarrollo económico y la industria global (Raiger, Laura, López, 2009). Sin embargo, las compañías petroleras, no han considerado un gas separado en las refinerías durante el proceso de desgasificación, que es producido junto con el crudo, como recurso para futuro procesamiento, sino como un producto de desecho que estaría en quema de mecheros (Juan et al., 2023). Al quemar ese gas se liberan varios contaminantes al aire, como CO<sub>2</sub>, metano, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y polvo fino. Estos gases y partículas aumentan el calentamiento global, causan lluvia ácida y empeoran la calidad del aire, lo que daña la salud de las personas y la vida de plantas y animales (Núñez Sanabria, 2023).

Sin embargo, este tipo de combustión tiene el potencial de ser utilizada en métodos alternativos de cogeneración que mitigan el impacto ambiental generado por la industria, mientras proporcionan una fuente adicional de energía. En este contexto, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable considera a la cogeneración como una línea de investigación que permitirá fomentar e impulsar el ahorro y la eficiencia energética en las industrias ecuatorianas (Arteaga et al., 2016). La Refinería de Esmeraldas, enfrenta desafíos significativos relacionados con el consumo energético y la generación de calor residual, estas instalaciones tienen un potencial considerable para implementar tecnologías de cogeneración que permitan reutilizar el calor residual para generar electricidad y vapor, incrementando así su eficiencia energética (Quiñónez et al., 2022).

**El problema científico** en el que se centra este estudio son los gases residuales producidos por el TEA mechero de la refinería de Esmeraldas produciendo contaminación y desperdicio de energía térmica, con el diseño de un sistema de cogeneración energética, aprovechando los residuos térmicos generados en el proceso de refinación de la Refinería de Esmeraldas, se busca optimizar el uso de estos residuos y mejorar la eficiencia energética de las operaciones, el objetivo principal es incrementar la eficiencia en la producción de energía al capturar el calor residual de los gases de combustión del TEA Mechero y redirigirlo para la generación de electricidad y calefacción interna dentro de la refinería.

Al aplicar la norma ISO 50001 se fijan reglas sencillas para encontrar ahorros, medir y vigilar el uso de energía, creando una base que garantiza que el sistema de cogeneración siga siendo eficiente con el tiempo. El proyecto contempla el diseño de un sistema de cogeneración energética integrado para la Refinería de Esmeraldas, que combine turbinas de vapor, intercambiadores de calor y otros componentes clave para optimizar el aprovechamiento de los residuos térmicos generados en la refinería. A través del diseño en MATLAB, se podrá dimensionar y modelar el sistema propuesto, evaluando su eficiencia energética, la reducción proyectada de emisiones y el impacto en el rendimiento del proceso de refinación, cuyas conclusiones sobre el diseño contribuirá a la planificación de un sistema que podría mejorar la sostenibilidad ambiental de la refinería, sin entrar en la fase de implementación física, pero proporcionando un modelo claro para futuras consideraciones.

Este estudio buscar dar respuesta a la siguiente **pregunta de investigación**. ¿De qué manera puede el diseño de un sistema de cogeneración energética optimizar el uso de residuos térmicos y mejorar la eficiencia energética en la Refinería de Esmeraldas? El diseño de un sistema de cogeneración permitirá aprovechar el calor residual de los gases de combustión, como los provenientes del TEA (Tierra elevada de antorcha) mechero, transformándolo en energía útil para la producción de electricidad y calor, lo que contribuirá a mejorar la eficiencia de los procesos internos de la refinería (Arteaga et al., 2016). Al instalar este sistema, la refinería requiere menos energía externa, usa mejor la que ya tiene y reduce los gases que saldrían al aire, con intercambiadores de calor y turbinas de vapor se recupera el calor perdido y hace más eficiente todo el proceso. Esto disminuye la contaminación, baja los costos y vuelve a la planta más competitiva y sostenible.

Así pues, el sistema de cogeneración propuesto será clave para optimizar el uso de residuos térmicos y mejorar la eficiencia energética en la Refinería de Esmeraldas.

**Objetivo General.** - Evaluar la factibilidad de un sistema de cogeneración energética que aproveche el calor residual del TEA y mejore la eficiencia en la Refinería de Esmeraldas.

**Objetivos Específicos.** -

- Caracterizar la cantidad de energía térmica residual generada por la combustión de los gases del TEA en la Refinería de Esmeraldas, utilizando datos operativos reportados por la planta y literatura técnica.
- Analizar las tecnologías de cogeneración mediante revisión de estudios técnicos de refinerías nacionales e internacionales, con condiciones operativas similares, comparando su aplicabilidad para identificar la más adecuada.
- Evaluar un sistema integrado de cogeneración que aproveche el calor residual generado en la Refinería de Esmeraldas, considerando rendimiento energético, viabilidad técnica y adaptabilidad física, usando herramientas de simulación y modelado en MATLAB.
- Establecer un análisis técnico estimando los costos de implementación y beneficios ambientales que genera el sistema de cogeneración mediante cálculos financieros y simulaciones de emisiones basadas en la composición del gas residual, programadas en MATLAB.

## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 1.1. Desarrollo teórico y conceptual

#### 1.1.1. Combustión

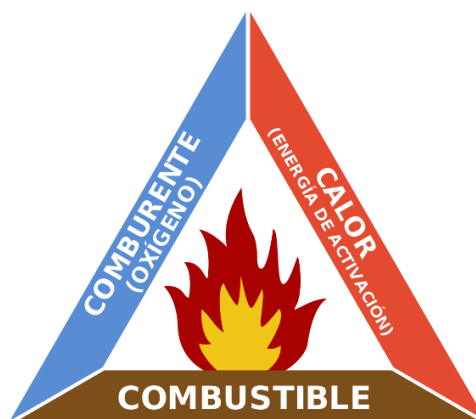
La combustión es un procedimiento en el que se muestran un conjunto de reacciones químicas de oxidación con liberación de calor, o sea, exotérmica. Este proceso es diferente a otros procesos de oxidación lenta por su mayor rapidez y la presencia de una llama. Se realiza mediante estos dos componentes del sistema de combustión (Simbaña et al., 2022).

El proceso de combustión se clasifica en:

- **Elaboración de la combinación:** En esta parte, el inyector pulveriza el combustible líquido y debe combinarse con el aire comprimido presente en la cámara de combustión. Este periodo es corto y aquí no se inicia todavía la combustión del combustible.
- **Encendido:** En esta etapa se genera la oxidación y el encendido localizado del combustible, este proceso inicia cuando la primera molécula de combustible comienza a arder.
- **Combustión general:** Eleva la temperatura de la cámara provocando una oxidación total de cualquier combustible, la cual de este combustible requerirá un tiempo, dado que no se quema de inmediato.

#### Figura 1

*Triángulo de elementos de la combustión*



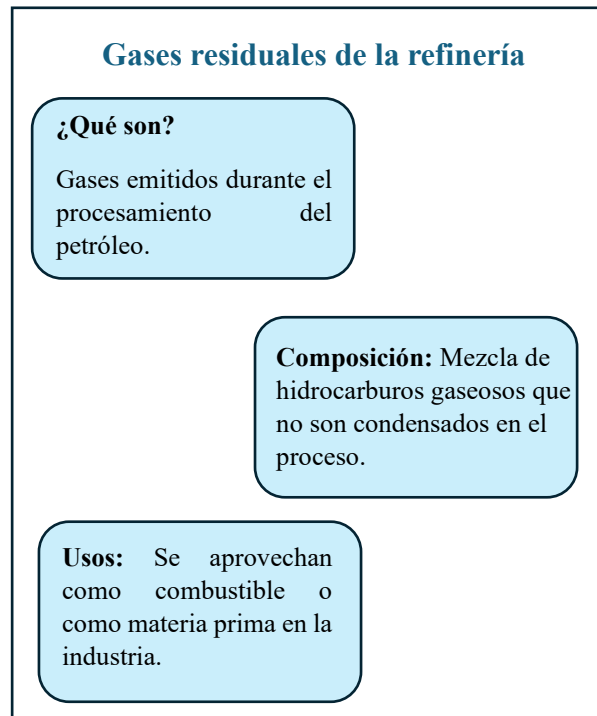
*Nota.* Tomado de (Cabrera et al., 2021)

En el contexto de las refinerías, la combustión en mecheros ocurre por la presencia de gases residuales. Estos son los que alimentan a la TEA. Por esto, a continuación, se describe su composición y características principales.

### 1.1.2. Gases residuales de refinería

**Figura 2**

*Gases residuales*



*Nota.* Elaboración propia

Según su composición y concentración de compuestos ácidos de estos gases residuales, tenemos:

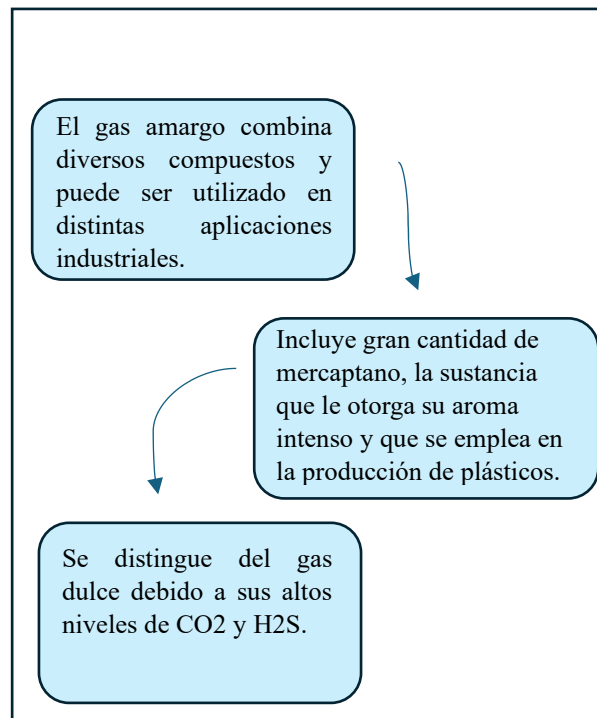
- **Gases residuales amargos (GR)**

Tiene partículas de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) que se los conoce también como gases amargos (Macias, 2007). Se denomina “gas agrio” porque tiene más de 16 ppm de  $H_2S$  si va por tuberías, y a partir de 4 ppm si es para uso casero, los compresores pueden aceptar hasta 160 ppm de  $H_2S$ , también cuenta cuánto  $CO_2$  lleva el gas: es preferible reducir el  $CO_2$  a menos de 2 % en volumen (Segundo, 2024).

Componentes y propiedades:

### Figura 3

#### Componentes y propiedades del gas amargo



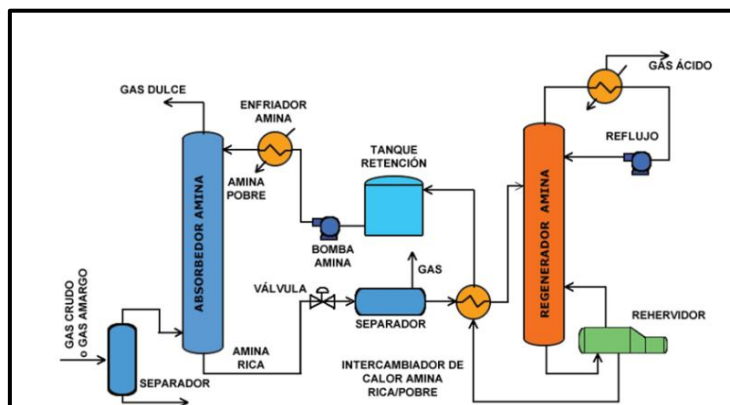
Nota. Elaboración propia en base de (Segundo, 2024)

- **Gases residuales dulce**

Estos gases se originan por la eliminación de compuestos amargos como el ácido sulfhídrico y dióxido de carbono, mediante el proceso conocido como endulzamiento (Durán, 2007).

### Figura 4

#### Proceso de endulzamiento



Nota. Tomado de (Tixi & Barahona, 2019)

Estos gases residuales influyen directamente en el funcionamiento de las refinerías. Un caso ilustrativo es que Refinería de Esmeraldas dispone de tres TEAS o quemadores de gases residuales: la TEA 2001 que quema 3000 kg/h de hidrocarburos, la TEA 2002 que quema 110 kg/h de gas rico en hidrógeno y la TEA 2003 que quema 2000 kg/h de gas ácido (rico en H<sub>2</sub>S). EP Petroecuador, en colaboración con la compañía MAELIN, evaluó opciones técnico-económicas para la recuperación de estos gases y la disminución de emisiones contaminantes como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y CO<sub>x</sub>. La TEA 2001 se determinó como la más apropiada para la cogeneración eléctrica, gracias a su elevado caudal y contenido energético (propano y butano), lo que además posibilita considerar su uso para producir GLP y aprovechar el gas residual en hornos y calderas dentro de la misma refinería (MAELIN, 2016).

**Tabla 1**

*Caracterización fisicoquímica TEA 2001*

Nombre de la corriente	Unidad	Gas
Caudal molar total	Kg-Mol/hr	68.32
Caudal másico total	Kg/hr	3000
Temperatura	°C	40.00
Presión	Kg/CM2G	0.05
Peso molecular total		43.91
<b>Fracciones de comparación molar</b>		
H <sub>2</sub>		0.000
Metano		0.153
Etano		0.102
Etileno		0.015
CO <sub>2</sub>		0.000
Propano		0.267

Ibutano	0.127
Butano	0.294
H2S	0.031
C2 Buteno	0.004
Pentano	0.002
Ipentano	0.001
13BD	0.001
C2Penteno	0.001

Nota. Tomado de (MAELIN, 2016)

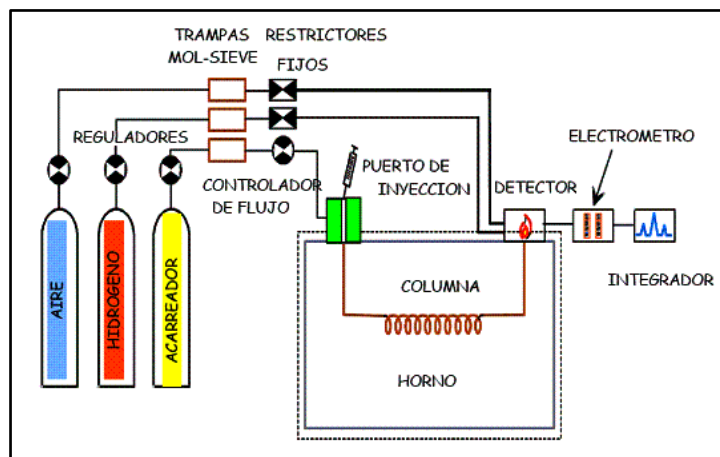
Debido a que la composición de los gases residuales es compleja, existen métodos analíticos que permiten identificar cada uno de sus componentes. Uno de los más empleados por la industria petrolera es la cromatografía de gases.

### 1.1.3. Cromatografía de gases

Una metodología analítica eficaz para separar, identificar y cuantificar los componentes de una mezcla se basa en la variación de las velocidades de migración de sus compuestos individuales al ser arrastrados por un gas inerte a través de un tubo lleno de un material apropiado que aguante un medio líquido estable o fijo (Montoya & Páez, 2012).

**Figura 5**

*Típico cromatógrafo de gases*



Nota. Tomado de (QuimiNet, 2007)

El análisis mediante cromatografía permite establecer la composición del gas residual, permitiendo calcular el poder calorífico superior (cantidad de calor total que es liberado durante la combustión). Esto es el principio para poder evaluar parámetros energéticos claves como la eficiencia energética, el balance térmico y rendimiento eléctrico, los cuales son fundamentales en el diseño de un sistema de cogeneración.

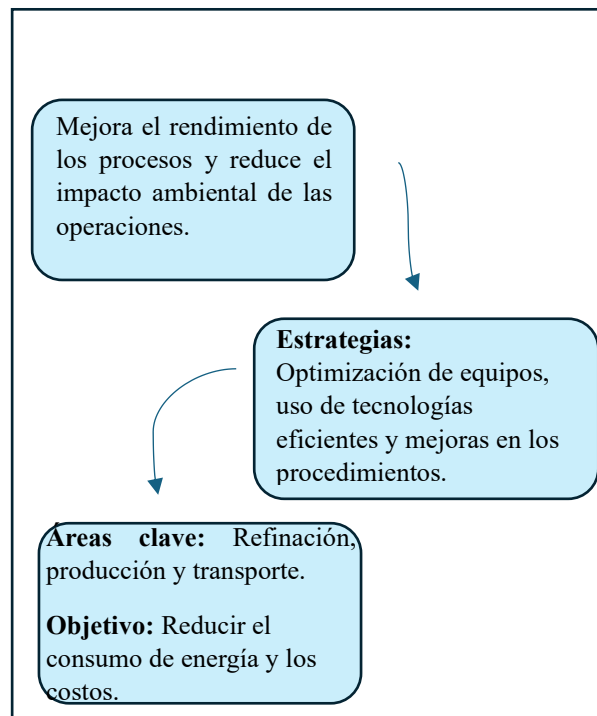
#### 1.1.4. Parámetros energéticos clave

- **Eficiencia energética**

La eficiencia energética se puede definir como una reducción en el consumo de energía al tiempo que mantiene los mismos servicios energéticos sin reducir nuestra comodidad y calidad de vida al proteger el medio ambiente, proporcionar la entrega y promover un comportamiento sostenible (Martinez, 2022).

#### Figura 6

*Importancia de la eficiencia energética*



Nota. Elaboración propia en base de (Gómez, 2021)

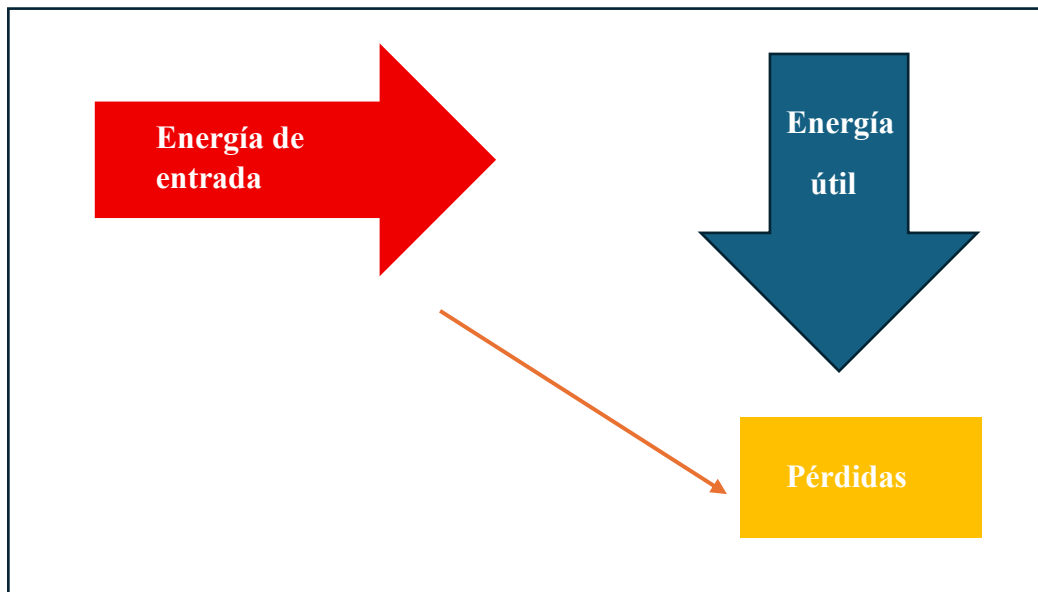
Para poder analizar de mejor manera la eficiencia de un sistema, es necesario establecer un balance térmico, que ayuda a saber la cantidad de energía de entrada, la útil obtenida y las pérdidas del proceso.

- **Balance térmico**

El balance térmico es una valoración numérica de los flujos de calor que entran y salen en un sistema específico. Facilita determinar la cantidad total de calor que el sistema absorbe y la cantidad total de calor que este rechaza. Este cálculo es fundamental para entender la eficiencia energética del sistema y asegurar el cuidado de productos susceptibles a la temperatura (Olivo, 2025).

**Figura 7**

*Balance térmico*



*Nota.* Elaboración propia en base de (Gómez, 2021)

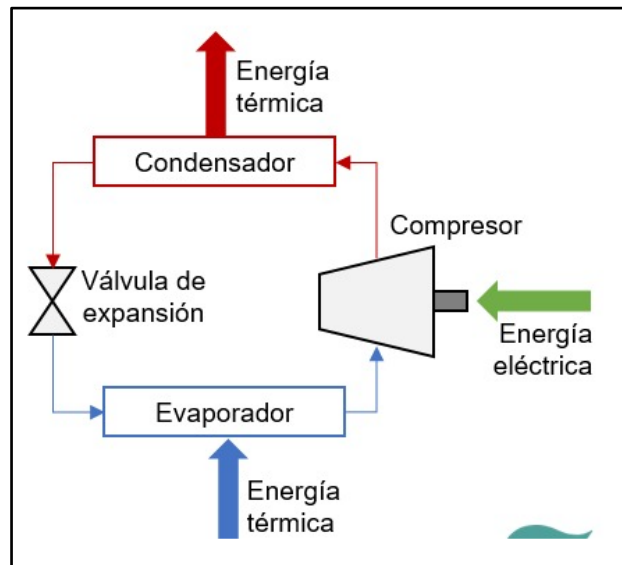
El balance térmico es útil para identificar pérdidas en los sistemas de cogeneración, pero también es importante medir la energía disponible que se transforma en electricidad útil, mediante el indicador de rendimiento eléctrico.

- **Rendimiento eléctrico**

Se refiere a la eficiencia energética de un aparato, máquina o dispositivo eléctrico, considerando la relación entre la energía adquirida para su operación y la energía utilizada o proporcionada por el aparato (Frigolutions, 2020).

## Figura 8

*Eficiencia y rendimiento en equipos térmicos*



*Nota.* Tomado de (S. Valencia, 2024)

Para superar las limitaciones que posee el rendimiento eléctrico en sistemas convencionales, donde gran parte del calor generado se pierde hacia el ambiente, se han desarrollado sistemas como la cogeneración energética, que recupera y reutiliza el calor residual.

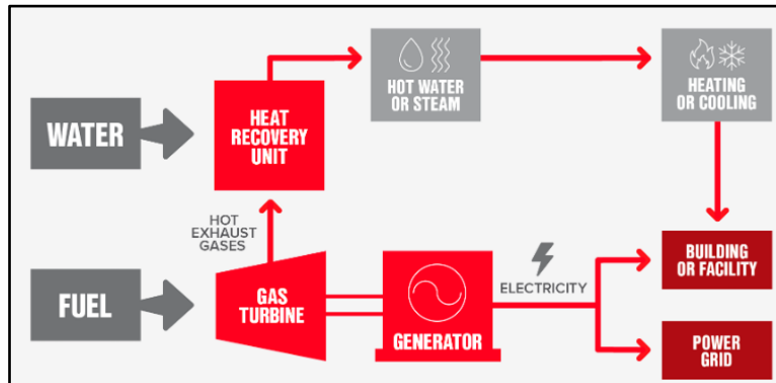
### 1.1.5. Cogeneración energética

La cogeneración se fundamenta en la generación conjunta de dos o más clases de energías. Usualmente, las energías producidas son de tipo eléctrico y calor, pero también pueden ser energía mecánica y calor (y/ o frío).

Las instalaciones de cogeneración optimizan la eficiencia energética al combinar la generación de electricidad y la utilización del calor sobrante en procesos industriales, comerciales o de servicios. Esto posibilita lograr rendimientos globales que oscilan entre el 75% y el 90% de la energía presente en el combustible (Cruz et al., 2020).

**Figura 9**

*Esquema de un sistema de cogeneración industrial*



*Nota.* Tomado de (Ramírez, 2018)

**Figura 10**

*Principales beneficios de la cogeneración*



*Nota.* Tomado de (Agencia de sostenibilidad energética, 2025)

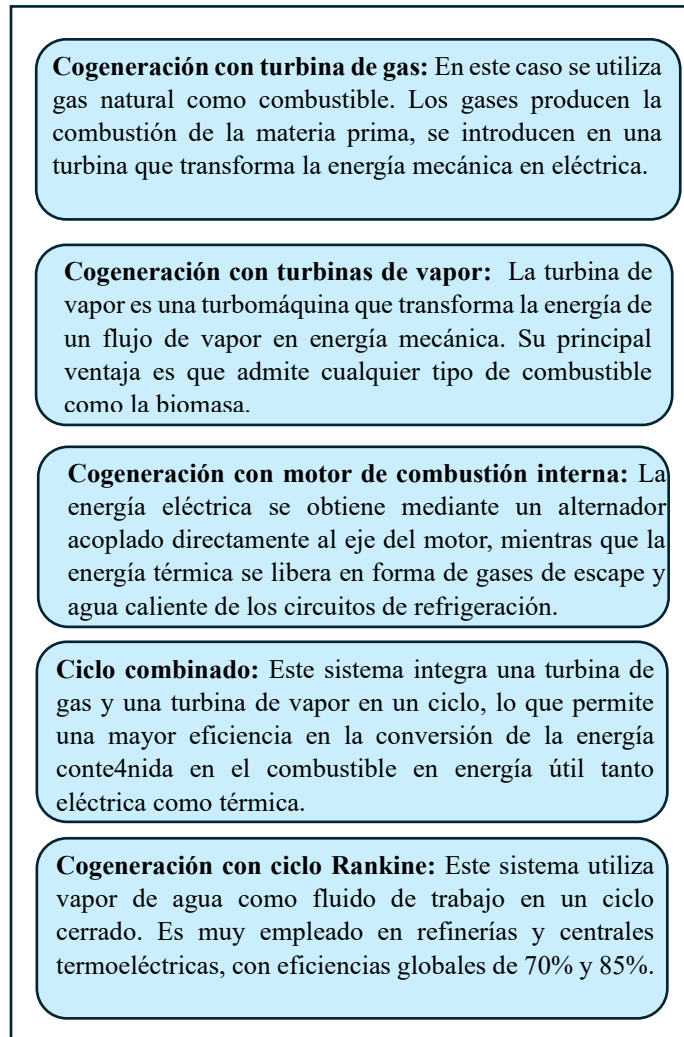
Luego de comprender la definición de cogeneración y beneficios, es importante conocer los diferentes tipos de este sistema, que varía en función del combustible utilizado, la escala de operación y las necesidades energéticas.

- **Tipos de sistemas de cogeneración**

De acuerdo con la tecnología empleada, hay diversas formas de cogeneración:

**Figura 11**

*Tipos de sistemas de cogeneración*



*Nota.* Elaboración propia en base de (Fraile, 2008)

Entre los diferentes sistemas de cogeneración mencionados, uno de los más adecuados para la industria es el Ciclo Rankine, debido a que es capaz de producir simultáneamente electricidad y vapor útil. Ajustándose a las condiciones de la refinería de Esmeraldas y al aprovechamiento del TEA.

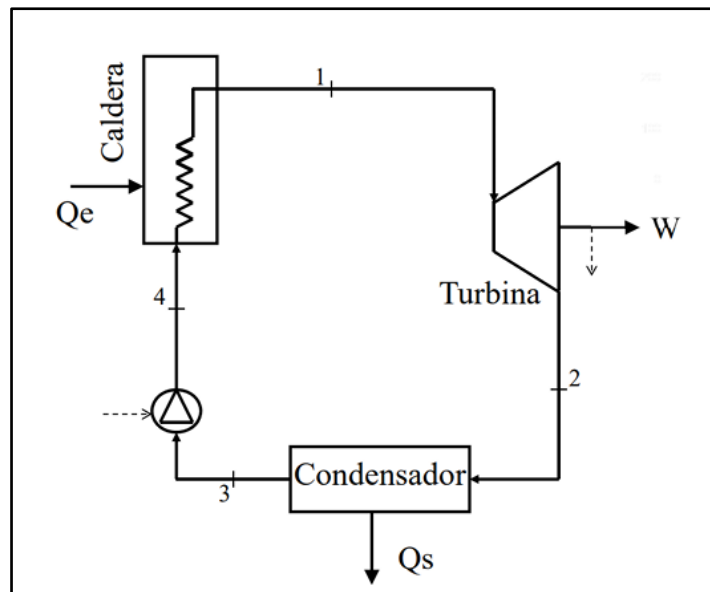
### 1.1.6. Ciclo Rankine

El Ciclo Rankine (RC) es un ciclo de potencia de vapor (usa vapor para impulsar una turbina), este ciclo convierte el calor en energía útil para generar electricidad mediante un fluido de trabajo, generalmente agua. Este funciona como un sistema cerrado, que se reinicia tras el proceso final y en el que el fluido no se encuentra en contacto con el entorno (Delgado, 2024).

El ciclo Rankine funciona de la siguiente manera: el vapor de agua que se genera en la caldera se expande en una turbina, cuyo eje está vinculado a un generador eléctrico. Después, el vapor que sale de la turbina es llevado a un condensador, donde le cede calor al líquido de enfriamiento y se genera la condensación del vapor de agua. Luego, el ciclo concluye cuando una bomba hace que el agua se traslade desde la presión del condensador a la presión de la caldera (A. Garcia, 2025).

**Figura 12**

*Esquema de un ciclo Rankine*



*Nota.* Tomado de (A. Garcia, 2025)

Para entender de mejor el funcionamiento del Ciclo Rankine es necesario explicar los equipos que lo conforman. A continuación, se describen los componentes principales del ciclo.

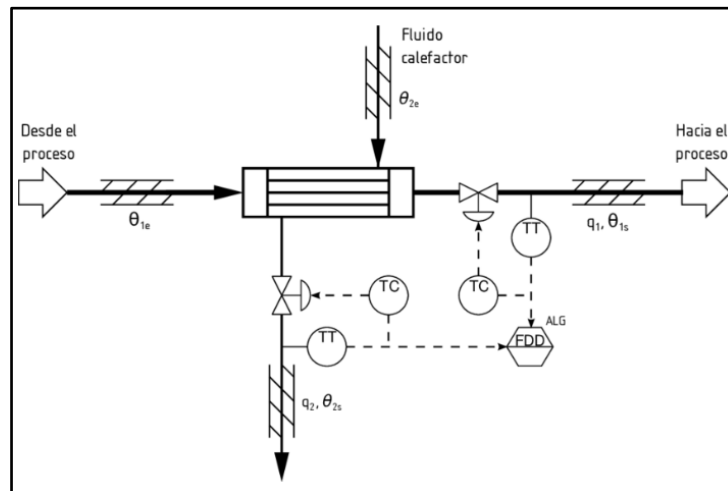
Khellaf (2016, como se citó en Reina-Quiñónez et al., 2018), plantea los siguientes elementos principales:

- **Intercambiadores de calor**

Los intercambiadores de calor posibilitan la transmisión de calor entre dos fluidos a diferentes temperaturas, usualmente evitando su mezcla. El proceso de transmisión del calor de un medio a otro en el intercambiador se realiza a través de los fenómenos denominados conducción y convección (Álvarez et al., 2020).

**Figura 13**

*Diagrama del proceso de un intercambiador de calor*



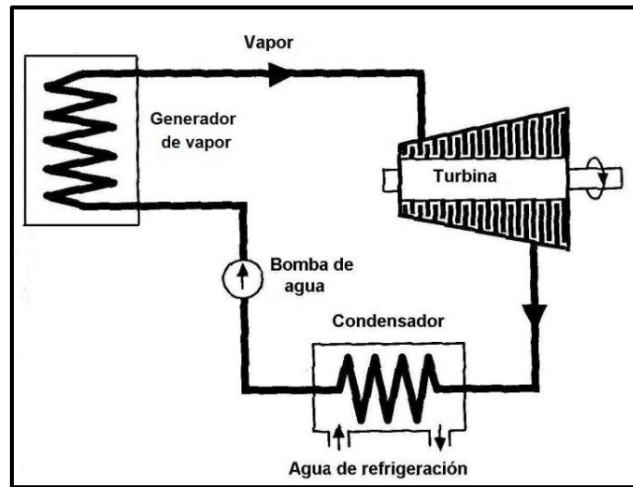
*Nota.* Tomado de (Bernardi, 2020)

- **Turbina de vapor**

La turbina de vapor es un dispositivo térmico que transforma la energía térmica del vapor de agua en energía mecánica, lo cual es fundamental para generar electricidad. El ciclo termodinámico de la turbina de vapor se basa en el ciclo Rankine, que comprende cuatro procedimientos termodinámicos: expansión, enfriamiento a presión constante, calentamiento a presión constante y compresión. Varios factores, como la presión y temperatura del vapor, la eficiencia de conversión de energía térmica a mecánica y la geometría de los álabes, afectan el funcionamiento de la turbina. Estos últimos son componentes esenciales que establecen cuán efectiva y duradera es la máquina. (M. Valencia, 2024) .

**Figura 14**

*Turbina de vapor*



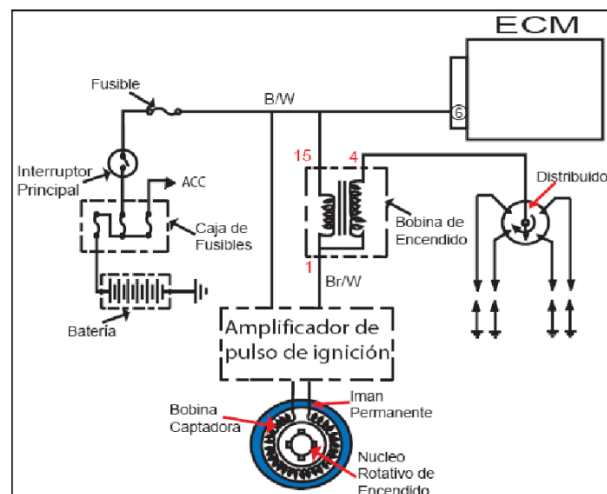
*Nota.* Tomado de (J. González, 2009)

- **Generador eléctrico**

El generador eléctrico es cualquier aparato capaz de conservar una variación en el potencial eléctrico entre dos de sus puntos conocidos como polos, terminales o bornes, convirtiendo la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se logra mediante la influencia de un campo magnético sobre los conductores eléctricos situados en una armadura conocida también como estator (Pahuanquiza, 2015).

**Figura 15**

*Diagrama eléctrico de un generador*



*Nota.* Tomado de (Rocha-Hoyos, 2008)

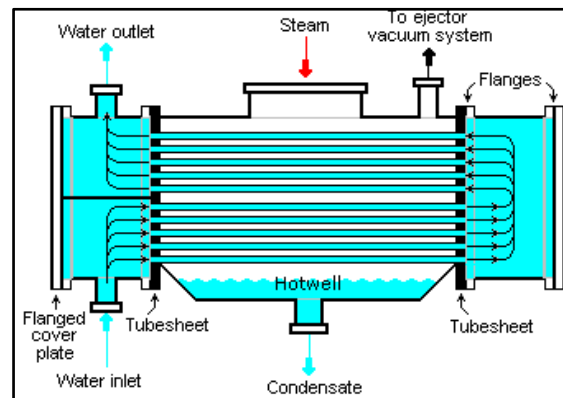
- **Condensador**

El condensador es un dispositivo esencial en múltiples procesos termodinámicos e industriales. Su principal función es convertir vapor en líquido a través de un proceso de refrigeración, lo que contribuye a mejorar la eficacia del sistema y recuperar el fluido laboral. Se lo utiliza con frecuencia en sistemas de aire acondicionado, enfriamiento, producción eléctrica y tratamiento de hidrocarburos, entre otros. (Revuelta Ruiz, 2023).

Hay diferentes clases de condensadores, cuya categorización puede efectuarse de acuerdo con varios factores como el tipo de refrigeración, la disposición constructiva o su uso particular.

**Figura 16**

*Diagrama del funcionamiento de un condensador*



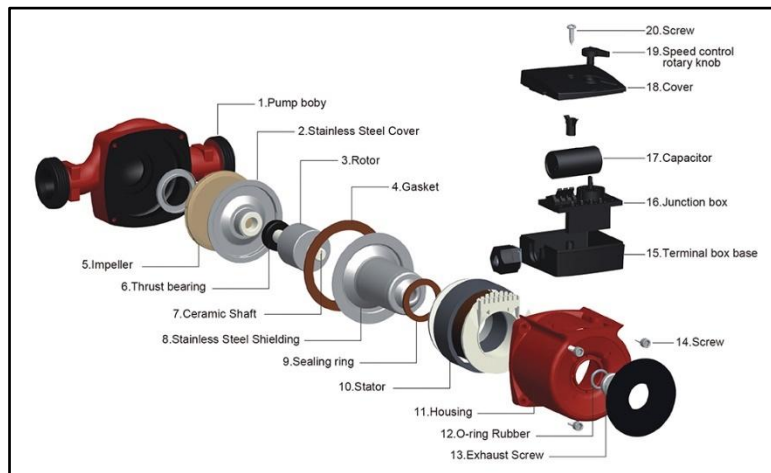
*Nota.* Tomado de (Thermal, 2018)

- **Bomba de recirculación**

Es un dispositivo hidráulico que tiene como propósito principal el mantenimiento del flujo constante de un fluido en un sistema cerrado, permitiendo su circulación continua por medio de un circuito o equipo. Estas bombas no tienen como objetivo generar una presión elevada, sino asegurar una velocidad de flujo constante que favorezca procesos como la mezcla homogénea de fluidos, el mantenimiento de condiciones operativas constantes o la transferencia de calor. Se utilizan a menudo en calefacción, refrigeración, purificación de agua y en circuitos térmicos como los que están relacionados con calderas y condensadores (L. Garcia & Gonzalez, 2022).

**Figura 17**

*Partes de una bomba de recirculación*



*Nota.* Tomado de (Stream, 2025)

Luego de revisar los principales sistemas de cogeneración y sus características, es indispensable revisar el aporte de diferentes autores, para comprender los avances y limitaciones que se han presentado en investigaciones similares.

## 1.2. Revisión de literatura

- **Factibilidad de cogeneración térmica de gas residual mechero refinera La Libertad (Steeve, 2024):** El estudio revisa cuánta energía se pierde en los gases que salen de la RLL (Refinería La Libertad), con ayuda de software y cálculos de calor, compara la energía que entra con el crudo y la que sale con los productos refinados se descubre que se puede instalar un intercambiador de calor para aprovechar el calor del gas agrio y así hacer la planta más eficiente, el análisis técnico, apoyado en simulaciones con el software Termoflow, determinó que el poder calorífico del gas residual alcanzaba aproximadamente 33.000 kJ/kg, con una temperatura de llama de 750 °C y un flujo másico de 0,95 kg/s, lo que permitió validar la transferencia efectiva de energía hacia un precalentador de crudo reducido, se destacó la importancia del sistema de control de la refinera, con válvulas automáticas y sistemas de regulación para garantizar la estabilidad de los parámetros operacionales, este enfoque sobre la recuperación de energía térmica residual y la adaptación de intercambiadores de calor es relevante para la implementación de proyectos de cogeneración energética en otras refineras, como la Refinería de Esmeraldas.

**Figura 18**

*TEA RLL funcional con flujo previo en tanque blowdown*

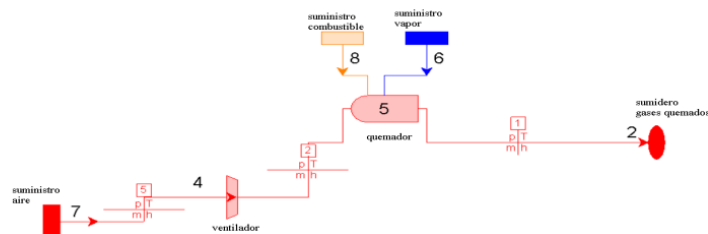


Nota. Tomado de (Steeve, 2024)

**Figura 19**

*Simulación de combustión de gases de la TEA RLL*

FUEL 1 STREAMS																
No. (Name)	Type	P (bar)	T (C)	H* (kJ/kg)	M (kg/s)	M.W.	Ash %	H2O %	Atomic %						LHV (kJ/kg)	HHV (kJ/kg)
									C	H	O	N	S	Ar		
6	Gaseous	1,02	35	31991,24	3,924	48,05	0	0	29,78	63,22	6,22	1,78	0	0	31976,86	34582,61
Fuel Streams: Additional Properties																
Stream 6 - Outlet of Fuel Source [8] -> Fuel inlet of Combustor [5] -> Gaseous fuel defined by mole percent																
Nitrogen														N2	0 %	
Carbon Dioxide														CO2	20 %	
Methane														CH4	1 %	
Ethane														C2H6	0,99 %	
Propane														C3H8	30,51 %	
n-Butane														C4H10	1,6 %	
Pentane														C5H12	10,5 %	
Isobutane														C4H10	5,01 %	
LHV														31977	kJ/kg	
HHV														34583	kJ/kg	
Molecular Weight														48,05		



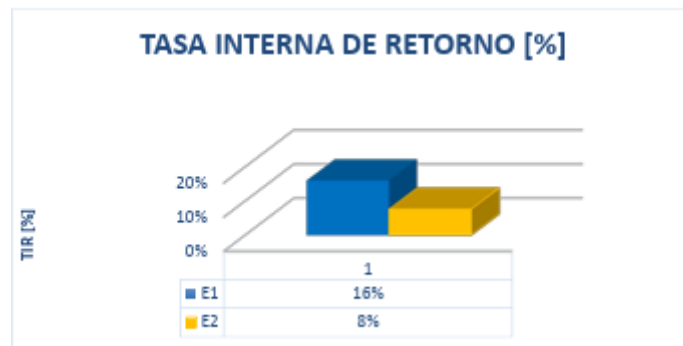
Nota. Tomado de (Steeve, 2024)

- Estudio para la cogeneración de energía eléctrica en las estaciones de producción de hidrocarburos (Sergio, Botía, César, 2019):** Este estudio analiza la viabilidad de un proyecto de cogeneración de energía eléctrica utilizando gas de desecho quemado en las TEAS de producción y turbinas acopladas a las tuberías de agua de producción en estaciones de hidrocarburos, el proyecto se considera viable tanto desde el punto de vista técnico como financiero, con una recuperación de la inversión estimada en seis años, el proyecto ofrece beneficios ambientales no cuantificados, al aprovechar el gas de desecho, lo que contribuye a la sostenibilidad del proceso, se destaca que la cogeneración es

especialmente viable en estaciones de tratamiento en construcción o en aquellas que están en proceso de ampliación, ya que permite la distribución de la generación de energía, reduciendo costos asociados a acometidas de larga distancia. Se calcula que el proyecto daría una ganancia de US\$ 71 182, lo que prueba que es rentable y mejora el uso de la energía, la cogeneración así planteada aumenta la eficiencia en plantas industriales y podría aplicarse en la Refinería de Esmeraldas para aprovechar el calor sobrante del proceso de refinación.

**Figura 20**

*Tasa interna de retorno*



*Nota.* Tomado de (Sergio, Botía ; César, 2019)

**Figura 21**

*Tiempo de recuperación de la inversión*



*Nota.* Tomado de (Sergio, Botía ; César, 2019)

- **Estrategias para la implementación de la cogeneración para un sistema de gestión de la energía en Colombia (Ramírez, 2018):** El estudio explica que hoy dependemos mucho del petróleo para generar energía pero las reservas se agotan y cada vez hace falta más energía para extraerlo, por eso las petroleras deben usar nuevas tecnologías que les ayuden a gastar menos energía y contaminar menos, una de esas tecnologías es la cogeneración, que usa el calor desperdiciado para producir más electricidad y así, reduce las emisiones y los costos, el trabajo también menciona los beneficios y retos de meter la cogeneración dentro de un sistema de gestión de energía y da ideas para que funcione bien, todo esto encaja con la Refinería de Esmeraldas, donde la cogeneración podría aprovechar el calor sobrante y hacer sus procesos más sostenibles.

**Tabla 2**

*FODA de la cogeneración*

<b>Factores Internos</b>	<b>Lista de Fortalezas:</b> <b>F1.</b> Alta competitividad por costos los operativos más bajos frente a los procesos convencionales. <b>F2.</b> La cogeneración es considerada una fuente de energía renovable. <b>F3.</b> Generación mínima de gases de efecto invernadero.	<b>Lista de Debilidades:</b> <b>D1.</b> Algunas tecnologías poseen especificaciones técnicas complejas. <b>D2.</b> Los escenarios de aplicación se limitan a muy pocas industrias. <b>D3.</b> La inversión inicial es elevada.
<b>Factores Externos</b>		
<b>Lista de Oportunidades:</b> <b>O1.</b> Reducción en los impuestos por uso de energías renovables. <b>O2.</b> Acceso a nuevos nichos de mercado (mercados verdes). <b>O3.</b> Futuro prometedor por la escases de fuentes convencionales de producción de energía basadas en combustibles fósiles.	<b>ESTRATEGIAS FO</b>	<b>ESTRATEGIAS DO</b>
<b>Lista de Amenazas:</b> <b>A1.</b> Falta de incentivo por parte del gobierno debido a la promoción de energía eólica o solar. <b>A2.</b> Las tecnologías de cogeneración de vanguardia aún están distantes de llegar al país. <b>A3.</b> Elevado índice de delincuencia que pone en peligro la integridad de las instalaciones.	<b>ESTRATEGIAS FA</b>	<b>ESTRATEGIA DA</b>

*Nota.* Tomado de (Ramírez, 2018).

Lo antes mencionado evidencia la importancia de relacionar la cogeneración no solamente con aspectos técnicos, sino también en el ámbito ambiental y normativo. A continuación, se presentan conceptos complementarios.

### 1.3. Situación energética y uso de cogeneración en Ecuador

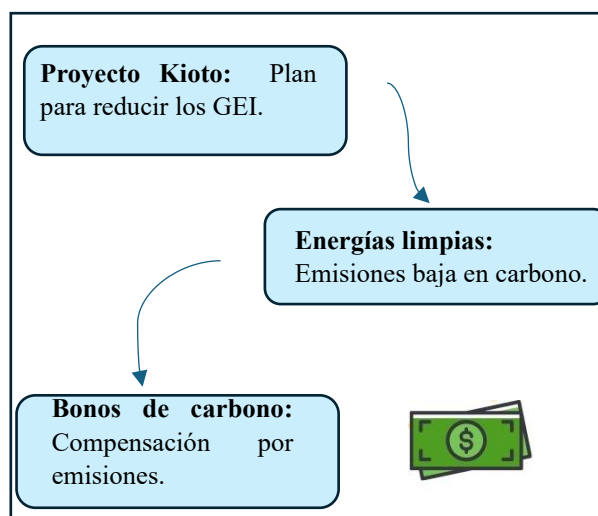
#### 1.3.1. Proyecto Kioto / Efecto Invernadero, energías renovables, bonos de carbono

Los bonos de carbono son instrumentos destinados a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de proyectos sustentables, cada bono simboliza una tonelada de CO<sub>2</sub> que no se ha liberado. Estos pueden ser adquiridos por industrias que exceden sus límites de emisión, el Protocolo de Kioto promueve este sistema mediante el mecanismo de desarrollo limpio (MDL) (Estrada Chavira et al., 2020).

En el año 2000, Ecuador ratificó el Protocolo de Kioto, asumiendo un compromiso con los países industrializados para regular las emisiones de gases de efecto invernadero (Organización de Naciones Unidas, 1998). La Constitución de 2008 proclamó que también existen derechos para la Tierra, y Ecuador demuestra su compromiso global al ratificar pactos como el Protocolo de Kioto y el Convenio de Diversidad Biológica (Tepan-Villa & Molina-Torres, 2024). Desde 2003, Ecuador ha estado involucrado en el mercado de carbono a través de iniciativas del Mecanismo de Desarrollo Limpio (Flores, 2023).

#### Figura 22

*Esquema conceptual para mitigar efecto invernadero*



*Nota.* Elaboración propia con base en (Estrada Chavira et al., 2020).

De esta manera, es esencial analizar la factibilidad energética del gas residual, el cual representa una fuente desaprovechada, pero con alto potencial de cogeneración.

### 1.3.2. Factibilidad energética del gas residual para cogeneración

La utilización del gas residual producido por la Refinería de Esmeraldas representa una opción viable para establecer sistemas de cogeneración, no solo por su accesibilidad sino también por el aporte energético que posibilita la generación de electricidad y vapor.

Esto se basa en la opción de sustituir la quema de fogones, convirtiendo con ello un desecho en un recurso energético para proporcionar eficiencia y sostenibilidad. No obstante, su puesta en marcha implica desafíos técnicos y financieros, uno de los cuales es la necesidad de eliminar compuestos corrosivos y tóxicos (H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>) para garantizar la viabilidad de los mercados de energía.

En términos jurídicos, la utilización de gas residual para cogeneración debe acatar la legislación ambiental en vigor en Ecuador, en consonancia con la norma ISO 50001.

**Figura 23**

*Normativa legal para cogeneración y eficiencia energética*



*Nota.* Elaboración propia con base en (Ministerio de energía y minas, 2019) e (ISO, 2018)

No obstante, este tipo de combustión tiene el potencial de ser utilizada en métodos alternativos de cogeneración que reducen el efecto medioambiental producido por la industria, ofrecen así un suministro extra de energía. Bajo estas condiciones, el valor total del petróleo, tanto el Brent como el WTI, se convierte en un indicador de la viabilidad económica. La producción diaria de este tipo de petróleo tiene un coste cercano a 2.10 USD por galón o 89 USD por barril (BPD). Durante este periodo, este precio ha sufrido cambios, desde 130 USD hasta menos de 40 USD, periodo 2008 y 2009, estas fluctuaciones son inexploradas y están determinadas por la dinámica de oferta y demanda en el mercado, geopolítica y economía mundial, un caso de esto se registró entre 2009 y 2014, con un precio de \$83 por barril, afectado por la crisis financiera mundial de 2009 de Estados Unidos, hacia finales de 2014, se mantuvo estable en \$85(Pazuelos, 2008).

**Tabla 3**

*Variedades de Crudos, Grado API, precio 2006/2007 (barril-dólar)*

	Crudos	Densidad *	Azufre (%)	Precio medio (dólares por barril)	
				2006	2007
SWEET	<b>LIGHT</b>				
	Arabian Sahara Blend	44	0,1	66,1	74,0
	Europe Libyan Es Sider	37	0,4	63,5	71,4
	Europe Nigerian Bonny Light	37	0,1	67,0	74,6
	WTI Cushing	40	0,2	66,0	72,4
	Europe Brent	38	0,4	65,2	72,4
	Europe Norwegien Ekofisk	43	0,1	65,3	73,1
	Canadian Par	40	0,3	64,3	71,4
	<b>MEDIUM</b>				
	Angola Cabinda	32	0,2	62,1	69,5
	Indonesia Minas	34	0,1	65,3	73,3
	Europe Forcados (Nigeria)	30	0,3	67,0	74,4
	Colombia Cano Limon	30	0,5	62,7	69,5
	Cameron Kole	35	0,3	62,3	70,3
	Australian Gipp Sland	45	0,1	67,9	75,5
Malaysia Tapis	44	0,1	70,0	77,7	
China Daqing	33	0,1	63,3	71,2	
SOUR	<b>LIGHT</b>				
	Asia Murban	40	0,8	66,0	72,6
	Qatar Dukhan	40	1,2	65,4	72,0
	<b>MEDIUM</b>				
	Asia Dubai Fateh	32	1,9	61,5	68,1
	Ecuador Oriente	29	1,0	53,9	61,4
	Mediterranean Seri Kerir Iran Light	34	1,4	61,0	69,2
	Mediterranean Seri Kerir Iran Heavy	31	1,6	59,1	67,5
	Kuwait Blend	31	2,5	59,3	66,3
	Saudi Arabian Saudi Light	34	1,7	60,3	68,4
	Saudi Arabian Saudi Heavy	31	2,3	55,4	65,8
	Saudi Arabian Arab Medium	28	2,8	58,0	66,7
	Venezuela Tia Juana	31	1,1	60,2	67,4
	Mexico Isthmus	35	1,5	59,9	67,3
	Egypt Suez Blend	32	1,5	58,7	66,7
Oman Blend	34	0,8	62,6	68,7	
Mediterranean Russian Urals	32	1,3	61,0	69,1	
<b>HEAVY</b>					
Canadian Lloyd Blend	22	3,1	43,7	-	
Mexico Maya	27	3,3	51,2	59,7	

\* Grados API

Nota. Tomado de (Pazuelos, 2008)

Para comprender de una mejor manera las posibilidades de aprovechamiento del gas residual, es importante abordar situaciones reales en Ecuador y en el mundo, destacando casos de aplicación los cuales sirven como referencia comparativa.

### 1.3.3. Situación de la cogeneración en Ecuador y en el mundo

En Ecuador, la industria petrolera Petroamazonas EP ha investigado la aplicación de sistemas de cogeneración con el objetivo de disminuir su huella de carbono y optimizar la utilización de los recursos energéticos (Henao-Espinoza et al., 2018). No obstante, las únicas industrias en Ecuador que han divulgado el empleo de la cogeneración en sus procesos son los ingenios de azúcar, empleando la biomasa como combustible. Este es el caso de los ingenios San Carlos, La Troncal, Monterrey y Valdés, que producen energía eléctrica de 35 MW, 29.8 MW, 3 MW y 36.5 MW, respectivamente (Arteaga et al., 2016). La cogeneración es un aporte significativo para la investigación nacional, además, representa una opción auténtica para incrementar la eficiencia energética en la industria, disminuyendo los efectos ambientales causados por la liberación de gases de efecto invernadero (Henao-Espinoza et al., 2018).

#### Figura 24

*Planta de cogeneración del Ingenio San Carlos, Ecuador*



*Nota.* Tomado de (san Carlos, 2023)

Para contextualizar la presente investigación es necesario tener en cuenta las características de la refinación de hidrocarburos en Ecuador, ya que en el sector se centra el consumo energético más alto y se generan grandes volúmenes de gases residuales.

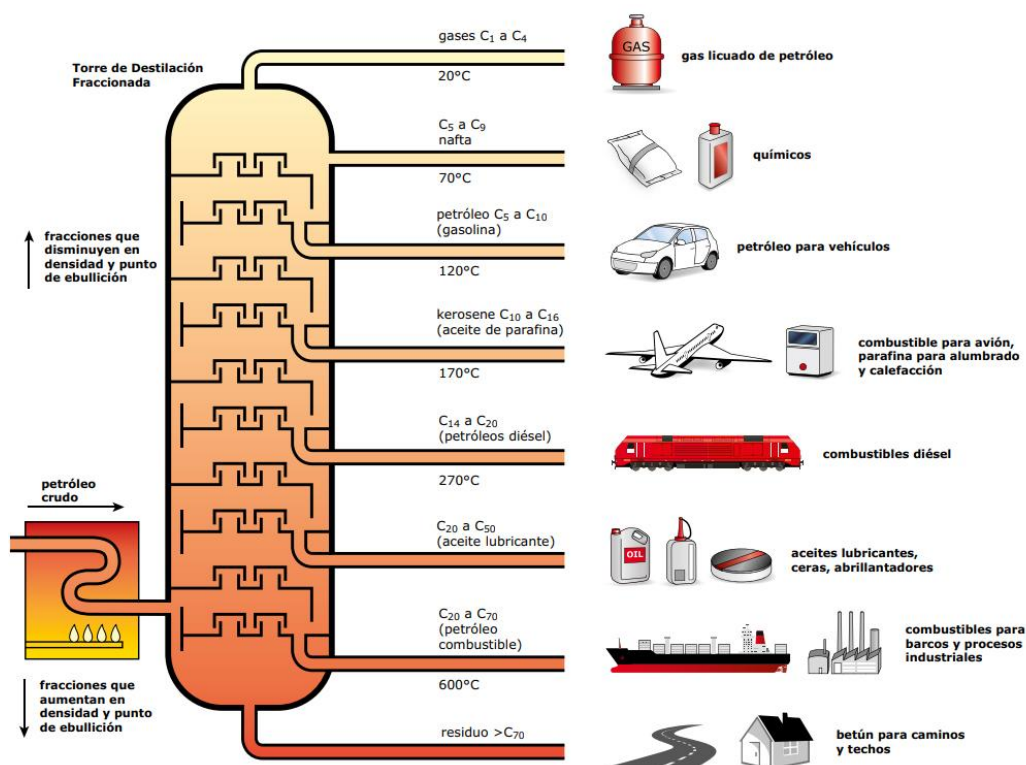
- **Refinación de hidrocarburos en Ecuador**

En las refinerías, el petróleo crudo se convierte en productos finales y refinados, especialmente GLP, gasolina, combustible pesado, combustible diésel, materias primas de petroquímicos, gasóleo para calefacción, aceite combustible y asfalto. Esto se realiza a través de la separación de los crudos en diversas fracciones, cada una con un punto de ebullición y distribución de la cantidad de carbono única, para después transformar estas fracciones en productos terminados, mediante una secuencia de transformaciones físicas y químicas (Pro, 2011).

En Ecuador, el PRAS (Programa de Reparación Ambiental y Social) detectó que infraestructuras como refinerías, hornos de carbón y pozos generan presión ambiental debido a la contaminación directa (Becerra et al., 2013). Las refinerías procesan petróleo para producir combustibles esenciales, favoreciendo el crecimiento económico y la seguridad energética. Sin embargo, sus procesos, como el craqueo o la desulfurización, producen desechos contaminantes. Estos desechos, al ser quemados en los hornos de combustión, liberan gases perjudiciales para el medio ambiente (A. González & Cataldo, 2024).

**Figura 25**

*Proceso de refinación del petróleo*



Nota. Tomado de (Oiltanking, 2015)

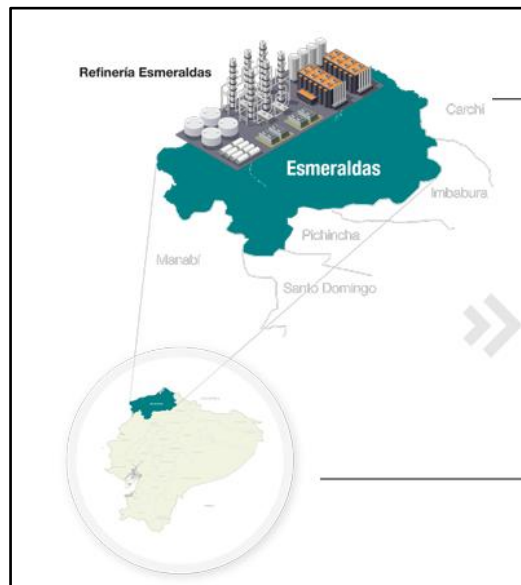
Dentro del sector industrial nacional, la Refinería Estatal de Esmeraldas (REE) representa la planta más grande, no solo por su capacidad instalada, sino también por la magnitud de sus emisiones y oportunidades de optimización energética. A continuación, se describen sus principales unidades de proceso y sistemas auxiliares.

- **Refinería Estatal Esmeraldas**

La Refinería Estatal Esmeraldas, es una industria de refinación del petróleo que convierte materiales naturales crudos, como el petróleo crudo y el gas natural, en productos útiles comercializables, manejada por la Empresa Pública EP PetroEcuador (Olga et al., 2023).

**Figura 26**

*Ubicación refinería de Esmeraldas*



*Nota.* Tomado de (EP Petroecuador, 2022)

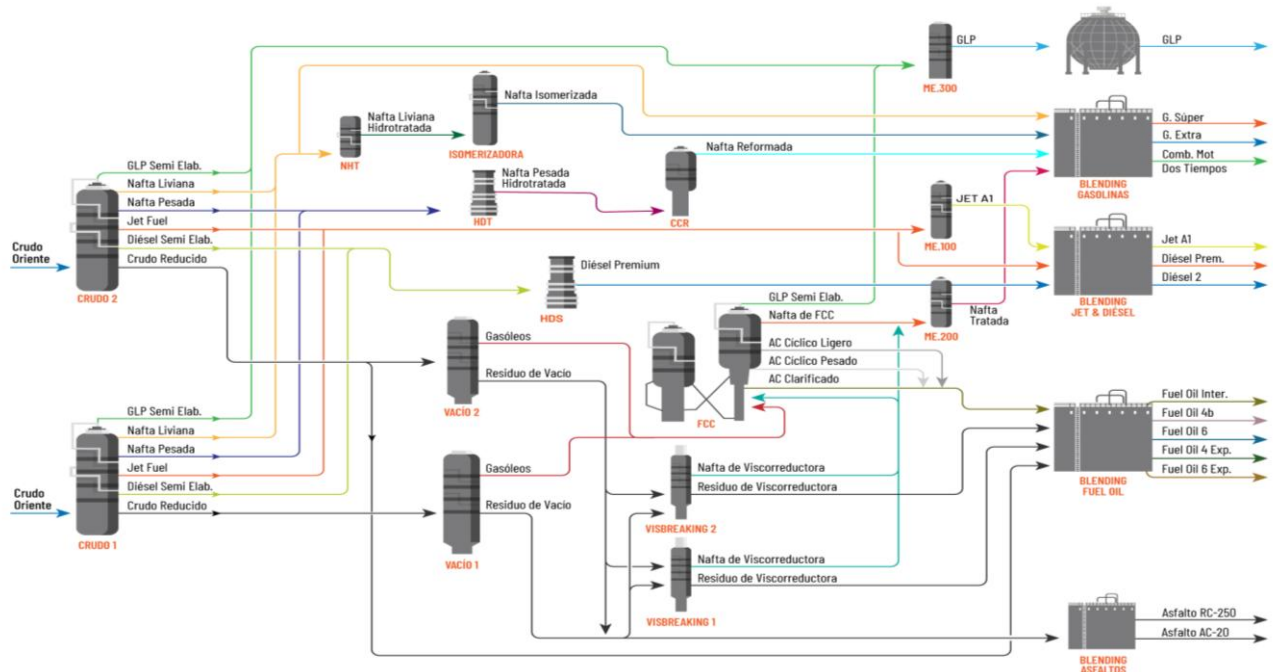
Se construyó y diseñó entre 1975 y 1977 con el objetivo de procesar 55.000 barriles diarios (BPD), su primera expansión a 90.000 BPD tuvo lugar en 1987 y en 1997 se incrementó su capacidad para procesar crudos de mayor peso y calidad inferior, además de incorporar nuevas unidades para potenciar la calidad de los combustibles y reducir el impacto en el medio ambiente. (Sanaguano, 2012) .

Las operaciones se estructuran en cinco áreas de proceso (Figura 27) que convierten el crudo en productos refinados. En las zonas no catalíticas se lleva a cabo la destilación atmosférica y al vacío, además de la desalación y el craqueo térmico. En las zonas catalíticas se utilizan tecnologías como el craqueo catalítico fluido (FCC) y el reformado

catalítico para incrementar la calidad de los combustibles. Además, se implementan procesos de regeneración continua de catalizadores (CCR) y de hidrodesulfuración, estas unidades permiten obtener combustibles más limpios y eficientes, cumpliendo con normativas ambientales (Tecnatom, 2018).

**Figura 27**

*Mapa de procesos de la refinería de Esmeraldas*



*Nota.* Tomado de (EP Petroecuador, 2023)

Como parte de la infraestructura de seguridad de la Refinería de Esmeraldas están los mecheros o TEAS (flares), en donde se realiza la quema controlada de gases residuales. Estos, aunque garantizan seguridad operacional, también representan una brecha de importantes emisiones y desaprovechamiento energético, lo que justifica sus análisis en este estudio.

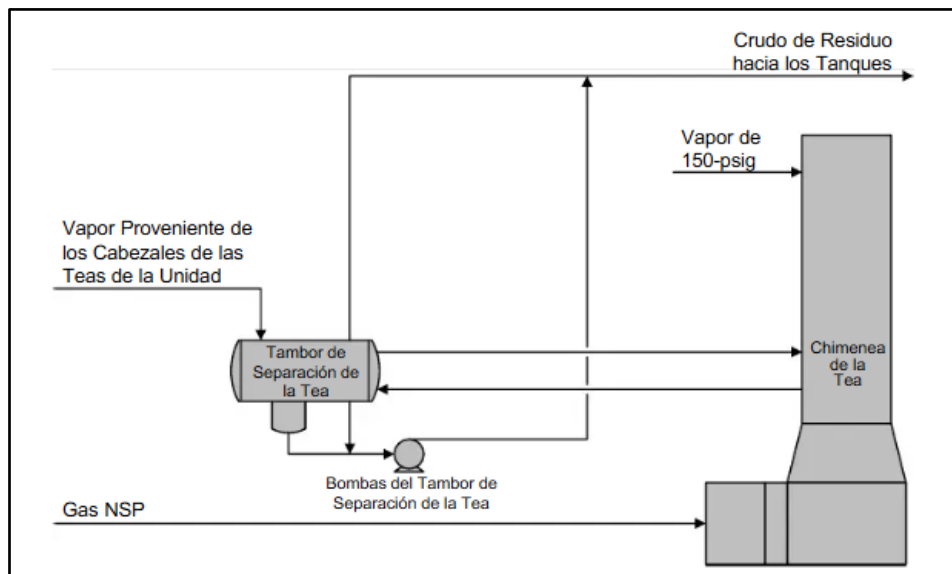
- **Mecheros o TEAS (Flare)**

Las chimeneas de TEA o mecheros (figura 28) son estructuras empleadas en el sector petrolero para la combustión de gases, con el objetivo de disminuir la exposición del personal a sustancias tóxicas, elevando su su quema a niveles seguros de acuerdo con normas como API-521 (Plazas, 2024). Estas estructuras pueden ser auto soportadas por sí mismas, sostenidas por guayas o por torres, estudios muestran que incluso los llamados

mecheros “ecológicos”, que tienen una altura entre 10 y 50 metros, generan hasta 150 sustancias químicas tóxicas durante la quema incontrolada de residuos orgánicos (Almeida et al., 2020). Aunque se ha diseñado para reducir riesgos, el efecto en el medio ambiente y en la salud de las comunidades adyacentes puede ser más severo que en los trabajadores de la refinería mismos. Esto demuestra que, a pesar de que se intente dispersar los contaminantes, la contaminación persiste.

**Figura 28**

*Sistema típico de TEA*



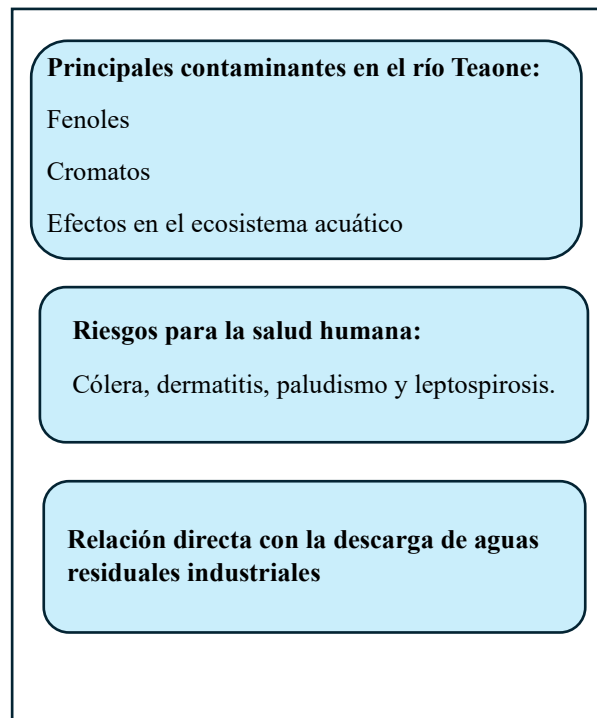
*Nota.* Tomado de (Technologies, 2013)

- **Estudios ambientales en la Refinería de Esmeraldas**

La Refinería de Esmeraldas ha sido objeto de varios estudios ambientales debido al impacto sobre los ecosistemas y la salud de la población. Aunque cuenta con un plan de contingencia y gestión de aguas residuales, parece ser insuficiente dado que aún persisten indicios de efluentes en las aguas del Teaone. Los afluentes que disminuyen el oxígeno y producen desechos orgánicos e inorgánicos, por la contaminación. Esto ha provocado la multiplicación de microorganismos y la acumulación de sedimentos, impactando la costa. Los desbordamientos en invierno, originados por derrumbes en el sistema de drenaje, fomentan la polución, originando enfermedades como paludismo, leptospirosis y dermatitis, en particular entre aquellos que utilizan el agua del río para sus actividades diarias (Ortiz, 2011).

## Figura 29

*Impacto de la contaminación por líquidos de la Refinería de Esmeraldas*



*Nota.* Elaboración propia con base en (Ortiz, 2011).

En lo que respecta a la calidad del aire, la Refinería de Esmeraldas es una de las principales que producen emisiones de material particulado, dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Como indica (Moreira, 2022), existen concentraciones de 22 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2.5</sub> y 37 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub> en zonas cercanas a los mecheros, niveles que, si bien no siempre superan los límites normativos, representan un riesgo significativo para la salud respiratoria de las poblaciones aledañas.

### Figura 30

#### Impacto de la calidad del aire de la Refinería de Esmeraldas



*Nota.* Elaboración propia con base en (Moreira, 2022)

Estos estudios confirman la necesidad de monitoreos continuos y la relevancia de proyectos de eficiencia energética y cogeneración, para mitigar emisiones y así reducir la quema de gas en mecheros, mejorando simultáneamente la sostenibilidad ambiental y la calidad de vida en la provincia de Esmeraldas.

En el capítulo 1 se presentó los fundamentos teóricos, conceptuales y ambientales relacionados con la cogeneración energética en contexto de la Refinería Estatal de Esmeraldas. Aquí se destaca la importancia de aprovechar el gas residual de la TEA 2001 como alternativa sostenible.

Con base a eso, en el siguiente capítulo se detalla la metodología empleada en la investigación.

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Contexto de la investigación

Esta investigación se llevó a cabo en la refinería de Esmeraldas, ubicada en la provincia del mismo nombre, al norte del país. La cual cuenta con dos unidades de destilación atmosférica, denominadas **Crudo 1** y **Crudo 2**, cada una tiene una capacidad de procesamiento de 55.000 barriles diarios.

Sin embargo, el proceso de refinación genera gases residuales que, al ser quemados en mecheros, no solo representa una pérdida de energía, sino que también tiene un impacto ambiental significativo, ya que se emiten dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), afectando tanto al medio ambiente como a las comunidades cercanas a la refinería. Por consiguiente, es crucial encontrar soluciones que conviertan esta pérdida en un recurso energético útil y respetuoso con el medio ambiente. Una de las alternativas más viables es la cogeneración energética, que permite recuperar el calor generado durante la quema de gases residuales y transformarlo en electricidad y vapor útil, mejorando así la eficiencia de los procesos industriales.

Con base en esta problemática, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad de recuperar esta energía mediante la simulación de un sistema de cogeneración utilizando MATLAB/Simulink. Esto responde a los objetivos estratégicos de eficiencia energética y sostenibilidad industrial establecidos por la Ley Orgánica de Eficiencia Energética, en conjunto con la norma ISO 50001:2018.

Buscando soluciones para:

### Figura 31

*Objetivos de la investigación*



*Nota.* Elaboración propia

Para llevar a cabo la propuesta es necesario definir el diseño y alcance de la investigación, que permite establecer el tipo de estudio, su enfoque metodológico y los límites de aplicación de los resultados.

## 2.2. Diseño y alcance de la investigación

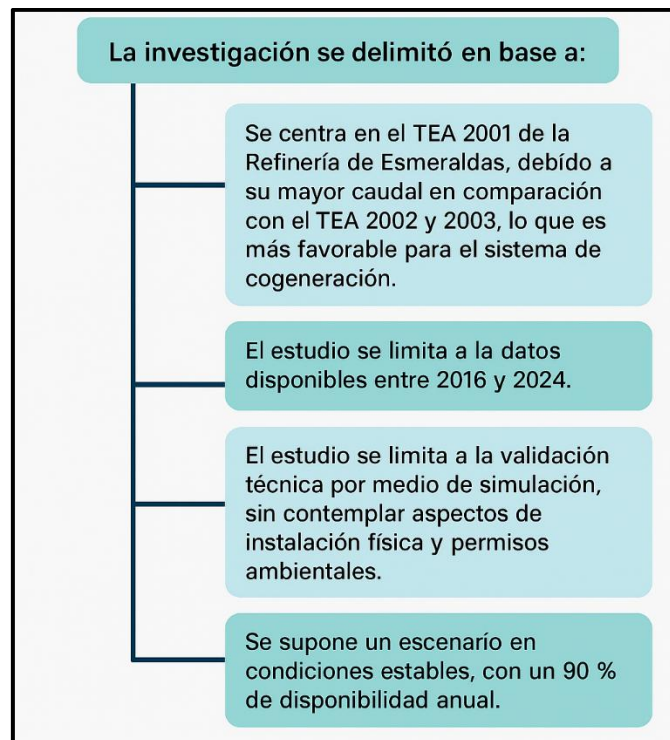
Este estudio tiene un enfoque experimental, ya que simula un sistema de cogeneración bajo condiciones previamente establecidas, contribuyendo a la imposibilidad de poder realizar pruebas piloto en la Refinería de Esmeraldas por problemas económicos y seguridad industrial; sin embargo, permite trabajar con datos reales de los procesos dando así validez a los resultados.

Tiene un enfoque descriptivo y explicativo, porque se detallan las características correspondientes del TEA 2001, como su composición química y poder calorífico, además, se busca explicar de una manera entendible la relación entre el uso de un sistema de cogeneración energética y el incremento de la eficiencia en la refinería.

El alcance de la investigación está delimitado por lo siguiente:

### Figura 32

*Alcance de la investigación*



*Nota.* Elaboración propia

Por lo que, se comprende que el estudio no busca implementar un prototipo físico, sino demostrar la factibilidad técnica y económica de un sistema de cogeneración que aproveche gases residuales del TEA 2001, contribuyendo a un modelo que pueda servir para futuras investigaciones, implementación y mejoramiento de este.

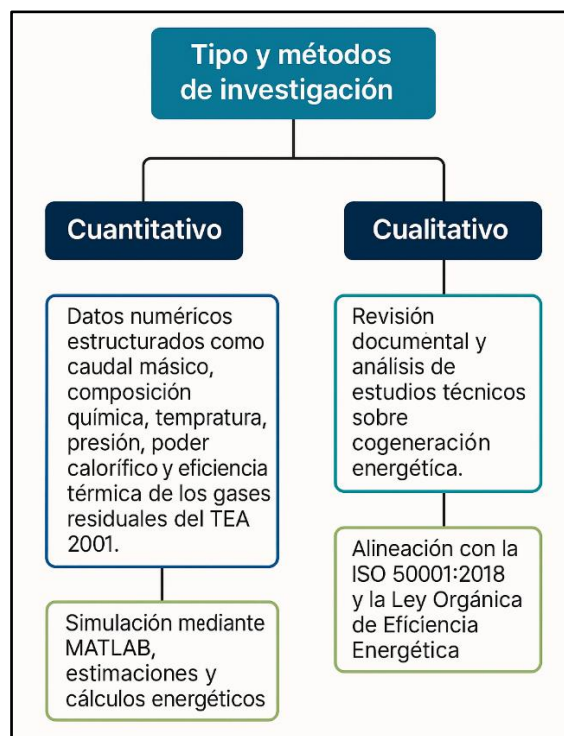
Para establecer con claridad el enfoque, como las herramientas metodológicas y validar la propuesta de cogeneración mediante simulación, es indispensable definir el tipo de estudio y métodos empleados.

### 2.3. Tipo y métodos de investigación

Esta investigación es de tipo mixto porque combina enfoques tanto cuantitativos como cualitativos en el desarrollo el estudio.

**Figura 33**

*Enfoques de la investigación*



*Nota.* Elaboración propia

El enfoque principal de la investigación es deductivo, partiendo de la hipótesis general de que la implementación de un sistema de cogeneración energética puede optimizar significativamente el aprovechamiento de los residuos térmicos en la Refinería de Esmeraldas.

El procedimiento metodológico seguido en la investigación comprendió cuatro etapas principales:

### Figura 34

*Etapas del procedimiento metodológico*



*Nota.* Elaboración propia

Considerando lo anterior, la combinación de métodos cuantitativos, cualitativos, deductivos y experimentales permitió no solo medir y validar el potencial energético del gas residual, sino también interpretar y proyectar su aprovechamiento dentro de un marco técnico, económico y normativo coherente con las necesidades del sector petrolero ecuatoriano.

Luego de esto es importante establecer la población y muestra considerada para la investigación. Para así poder delimitar el tema con claridad.

#### 2.4. Población y muestra

Para este estudio la población son los gases residuales emitidos en los mecheros de la Refinería de Esmeraldas: TEA 2001, TEA 2002 y TEA 2003. Estos cumplen la función

de eliminar los excedentes de gas, por medio de la quema al aire libre, lo que es común en la industria de refinación.

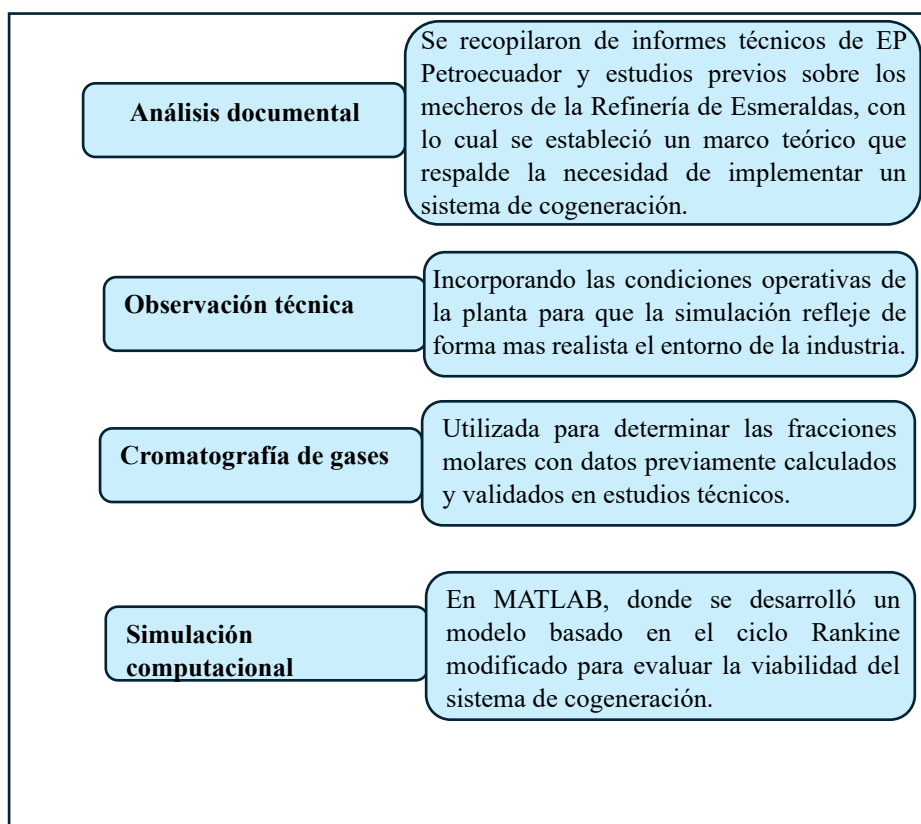
Dentro de la población, se seleccionó como muestra la TEA 2001, porque es la de mayor poder calorífico (propano 26,7 % y butano 29,4 %), y, por tanto, la que ofrece mayor potencial para evaluar la viabilidad de un sistema de recuperación energética mediante cogeneración. De esta manera los resultados obtenidos pueden considerarse como referencia a futuras investigaciones sobre cogeneración en el sector petrolero u otras refinerías.

## 2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La investigación se basó en una combinación de técnicas cualitativas y cuantitativas que facilitaron la obtención de información confiable y suficiente para caracterizar el gas residual del TEA 2001 y validar la factibilidad del sistema de cogeneración mediante simulación.

### Figura 35

*Técnicas e instrumentos de recolección de datos*

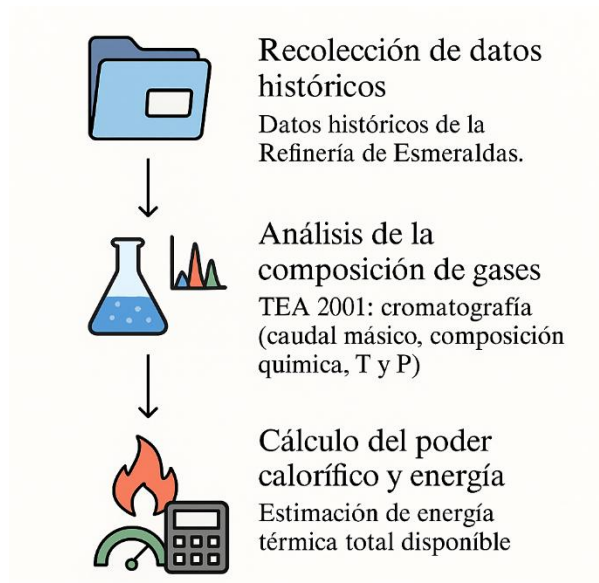


*Nota.* Elaboración propia

## 2.5.1. Caracterización de la energía térmica residual del TEA Mechero

Figura 36

Metodología para la caracterización de energía térmica



Nota. Elaboración propia

Para describir la energía térmica disponible en el gas residual del TEA 2001, se utilizó la información técnica proporcionada por la Refinería de Esmeraldas, la cual indica un caudal másico de 3000 kg/h y una composición rica en hidrocarburos como propano (26.7%) y butano (29.4%), se emplearon fórmulas termoquímicas para estimar el poder calorífico superior de la mezcla, esta caracterización confirma el alto potencial energético del gas residual, lo que lo hace viable para su aprovechamiento en procesos de cogeneración.

Las ecuaciones utilizadas fueron:

- Convierte cada fracción molar en fracción másica

$$X_i = \frac{y_i * MW_i}{\sum (y_j * MW_j)} \quad (1)$$

Donde:

$y_i$ : Fracción molar

$MW_i$ : Peso molecular

- Calcular la contribución energética

$$\text{Contribución energética} = X_i * PSC_{componente} \quad (2)$$

- Energía térmica disponible

$$E_{termmica} = m * PCS_{mezcla} \quad (3)$$

### 2.5.2. Análisis de tecnologías de cogeneración

**Figura 37**

*Análisis de tecnologías de cogeneración*



*Nota.* Elaboración propia

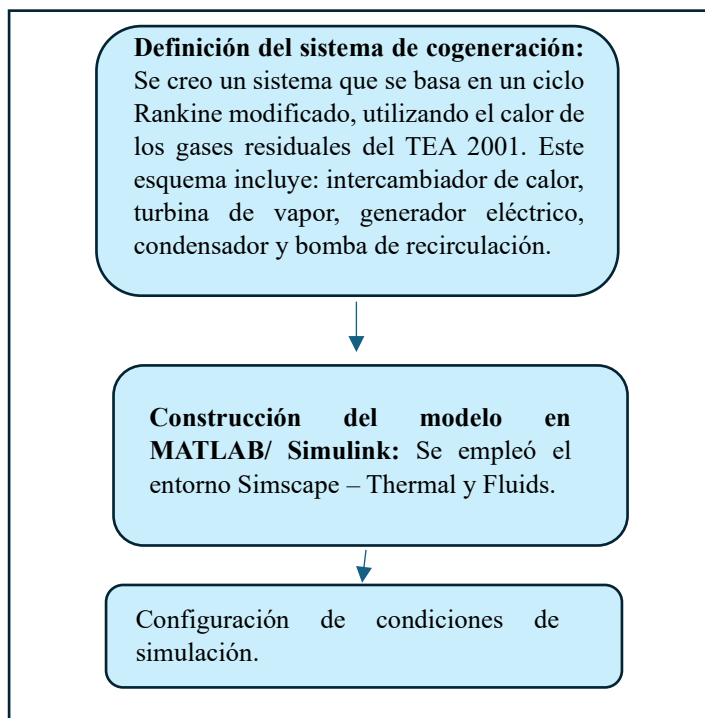
Se analizaron distintas tecnologías que son aplicables a sistemas de cogeneración para refinerías, considerando los parámetros operativos del gas de la TEA 2001, se elaboró una matriz comparativa entre intercambiadores de calor, turbinas de vapor, generadores eléctricos y condensadores, se seleccionaron intercambiadores tipo carcasa y tubos por su resistencia térmica, turbinas de contrapresión por permitir la reutilización del vapor en procesos internos y generadores síncronos para asegurar la estabilidad de voltaje, esta selección fue realizada considerando la normativa ISO 50001 teniendo en cuenta primero la eficiencia energética y sostenibilidad ambiental.

### 2.5.3. Simulación del sistema en MATLAB

La simulación en MATLAB/Simulink es la parte principal de esta investigación, porque nos permite validar de manera técnica y operativa la viabilidad del sistema de cogeneración para la Refinería de Esmeraldas. Utilizar herramientas de modelado dinámico tiene todo el sentido, especialmente porque construir prototipos físicos en la planta sería demasiado costoso, arriesgado y logísticamente complicado.

**Figura 38**

*Metodología aplicada en la simulación*

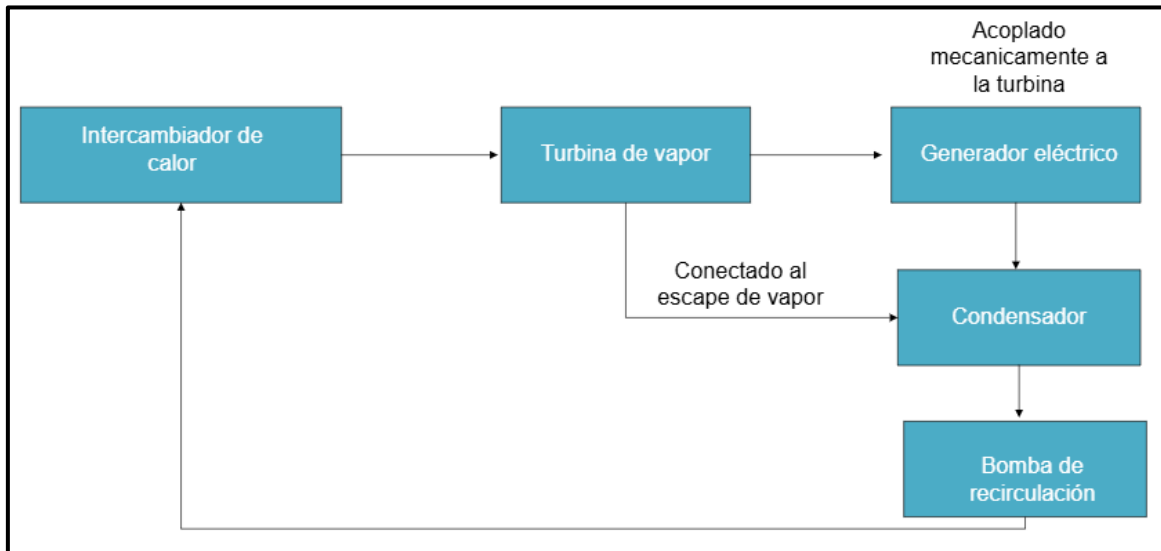


*Nota.* Elaboración propia

En la Figura 39 se presenta el sistema de cogeneración propuesto, el cual se conecta directamente al gas residual proveniente del sistema TEA 2001 con el fin de aprovechar su contenido térmico y transformarlo en energía útil:

### Figura 39

#### Esquema del sistema de cogeneración



*Nota.* Elaboración propia

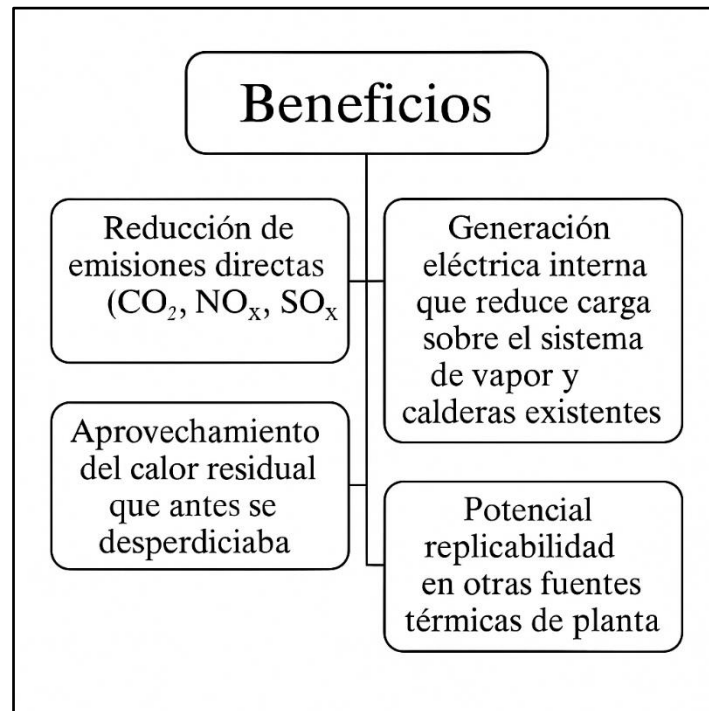
Este diseño inicia desde un intercambiador de calor, el cual capta el calor del gas quemado en el mechero (normalmente perdido en forma de llama directa), en este componente, el fluido de trabajo (agua) absorbe la energía térmica del gas, transformándose en vapor, este vapor presurizado es dirigido hacia una turbina de vapor, la cual convierte la energía térmica en energía mecánica rotacional, la turbina se encuentra acoplada a un generador eléctrico, que transforma la energía mecánica en energía eléctrica que es utilizable dentro de la propia refinería por ejemplo, para alimentar bombas, instrumentación o iluminación, contribuyendo así al autoconsumo energético.

Posteriormente, el vapor de escape de la turbina se enfría en un condensador, retornando a estado líquido. Una bomba de recirculación impulsa nuevamente el fluido hacia el intercambiador, cerrando el ciclo térmico, este sistema constituye un ciclo Rankine modificado, adaptado a las condiciones del gas de la TEA 2001 y simulado computacionalmente en MATLAB/Simulink para validar su viabilidad operativa.

Con esta propuesta, se transforma un pasivo ambiental, gas residual que actualmente se quema en la TEA sin aprovechamiento energético en una fuente activa de energía, con beneficios en:

**Figura 40**

*Beneficios de la propuesta*



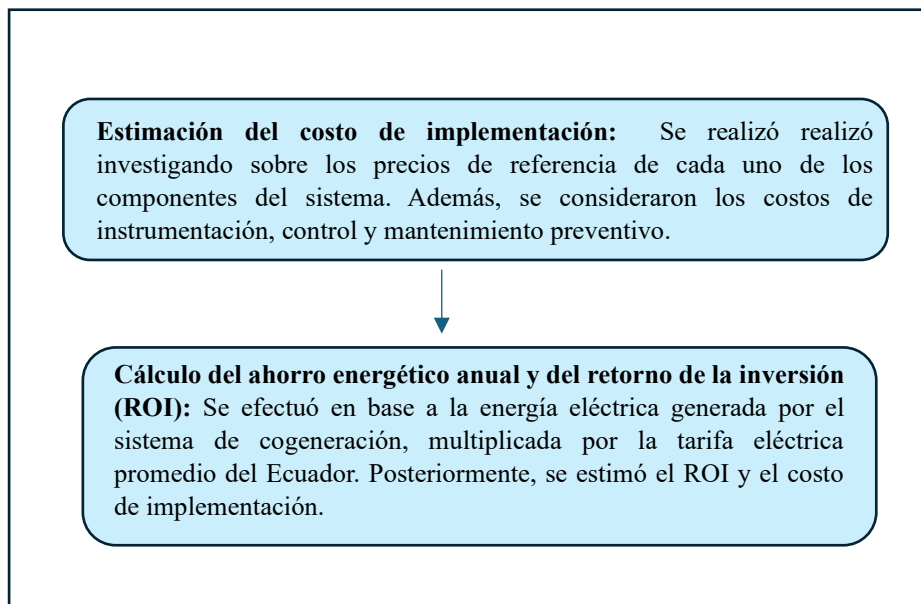
*Nota.* Elaboración propia

#### **2.5.4. Evaluación técnica y ambiental**

La evaluación técnica y ambiental del sistema de cogeneración, mediante programación en MATLAB mediante el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub>, es una etapa clave en la investigación. No solo nos ayuda a entender si es viable desde el punto de vista operativo, sino que también nos permite analizar los impactos económicos y ambientales que podrían surgir de su implementación.

## Figura 41

*Metodología aplicada en la evaluación técnica y ambiental*



*Nota.* Elaboración propia

### **Formula del retorno de la inversión:**

$$ROI = \frac{\text{Beneficio anual neto} - \text{Costo de inversión}}{\text{Costo de inversión}} \times 100 \quad (4)$$

### **2.6. Fiabilidad y validez de las herramientas utilizadas para la recopilación de información.**

Para garantizar la validez de los datos empleados en esta investigación, se utilizaron registros técnicos oficiales proporcionados por EP Petroecuador sobre las condiciones de operación del sistema TEA 2001, estos incluyen mediciones de caudal másico, temperatura de llama, presión del sistema y datos referenciales de la composición del gas residual, generados a partir de hojas de datos y reportes operativos, la confiabilidad de estos instrumentos está respaldada por su uso continuo en planta, su calibración periódica y su integración con los sistemas de control de proceso industrial.

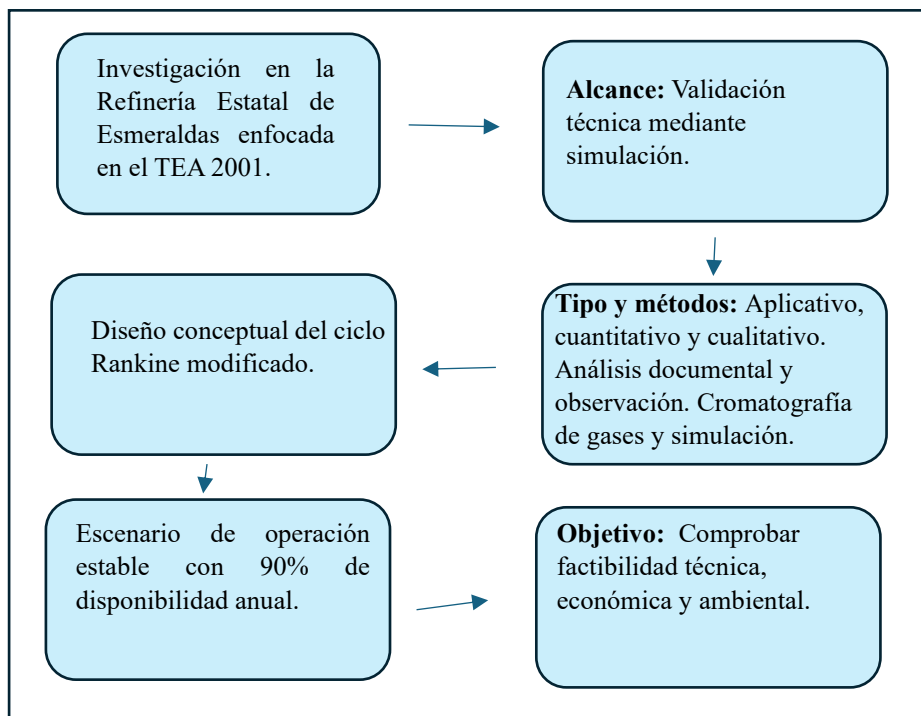
En cuanto a la composición química del gas, no fue posible realizar nuevas pruebas de cromatografía debido a restricciones logísticas, así pues, se emplearon datos referenciales trazables a estudios anteriores, contrastados con literatura técnica nacional e

internacional. Esta composición fue ajustada considerando el tipo de crudo procesado actualmente en la Refinería de Esmeraldas, grado API aproximado de 25.5 y validada mediante criterio técnico especializado.

La simulación del sistema de cogeneración se realizó utilizando MATLAB R2024b, dentro del entorno Simulink, que permite modelar sistemas térmicos bajo parámetros reales de operación, se ingresaron manualmente los valores operativos medidos y se aplicaron ecuaciones termoquímicas para modelar la recuperación de energía, los resultados obtenidos fueron contrastados con estudios previos de refinerías similares, especialmente con el modelo aplicado en la Refinería La Libertad, encontrándose coincidencias técnicas en la temperatura de llama, composición referencial y potencial energético del gas, estos elementos otorgan confiabilidad al modelo simulado y sustentan la viabilidad del sistema propuesto en la presente investigación.

### Figura 42

#### Resumen del capítulo 2



Nota. Elaboración propia

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Caracterización energética del gas residual del TEA 2001

Con base en los registros técnicos proporcionados por EP Petroecuador, la corriente gaseosa proveniente de la TEA 2001 presenta un caudal másico de 3000 kg/h, una temperatura promedio de 40 °C, presión de 0.05 kg/cm<sup>2</sup> y una composición predominante de hidrocarburos como propano (26.7%) y butano (29.4%), según el análisis cromatográfico realizado en estudios previos.

Se parte de la composición molar del gas residual que están en la tabla 6. Luego se convierte cada fracción molar en fracción másica con la ecuación 1:

- **Metano**

$$X_i = \frac{0.153 * 0.01604 \text{ kg/mol}}{\Sigma(0.0431 \text{ kg/mol})} = 0.569$$

Se multiplica cada fracción másica por el poder calorífico superior individual del gas el cual viene dado por bibliografía técnica para cada componente, utilizando la ecuación 2:

- **Metano**

$$X_i = 0.0569$$

$$PSC_{\text{metano}} = 55.5 \text{ MJ/kg}$$

Entonces:

$$\text{Contribución energética} = 0.0569 * 55.5 = 3.10 \text{ MJ/kg}$$

Este procedimiento se hace para cada uno de los componentes, tenemos el resumen de los resultados en la siguiente tabla:

**Tabla 4***Resumen de cálculos obtenidos*

Componente	y (fracción molar)	Peso molecular (MW) kg/mol	y*MW	Xi (fracción másica)	PCS (MJ/kg)	PCS mezcla MJ/kg
Metano	0.153	0.01604	0.00245	0.0569	55.5	3.10
Etano	0.102	0.03007	0.00306	0.069	51.9	3.58
Etileno	0.015	0.02805	0.00042	0.0095	47.2	0.448
Propano	0.267	0.04410	0.0117	0.267	50.35	13.44
Ibutano	0.127	0.05812	0.00738	0.1685	49.5	8.34
Butano	0.294	0.05812	0.01708	0.3899	49.5	19.3
H2S	0.031	0.03408	0.00105	0.0239	18.0	0.43
C2 Buteno	0.004	0.05611	0.00022	0.005	45.0	0.225
Pentano	0.002	0.07215	0.000144	0.0032	48.0	0.153
Ipentano	0.001	0.07215	0.00007	0.00159	48.0	0.076
13BD	0.001	0.05409	0.00005	0.00114	47.0	0.054
C2 Penteno	0.001	0.07013	0.00007	0.00159	47.0	0.074

*Nota.* Elaboración propia

El valor de 49.22 MJ/kg posiciona a este gas residual dentro del rango energético de combustibles industriales como el GLP (50–52 MJ/kg), lo cual evidencia su viabilidad técnica como fuente energética para un sistema de cogeneración.

Una vez obtenido el valor del poder calorífico superior se procede a calcular la energía térmica disponible por hora, con la ecuación 3:

$$E_{termmica} = m * PCS_{mezcla} = 3000 \frac{kg}{h} * 49.22 \frac{MJ}{kg} = 147\ 660 \frac{MJ}{h}$$

$$E_{termmica} = \frac{147600}{3600} = 41.02 \text{ MWh}$$

La disponibilidad horaria de aproximadamente 41.02 MWh térmicos en condiciones estándar representa un recurso significativo que puede ser transformado en electricidad, vapor o calor útil para procesos internos de la refinería, reduciendo el consumo de energía externa y minimizando la emisión de gases contaminantes producto de la combustión en mechero.

Luego de encontrar el poder calorífico superior y la energía térmica disponible, se procede a analizar las tecnologías de cogeneración más adecuadas para el sistema.

### **3.2. Análisis comparativo de tecnologías de cogeneración aplicables**

La selección adecuada de tecnologías de cogeneración es un paso esencial para garantizar la viabilidad técnica y operativa del sistema propuesto, esta evaluación se realiza considerando criterios como: eficiencia térmica, compatibilidad con el tipo de combustible disponible, facilidad de integración al proceso industrial existente, costos de inversión y mantenimiento, impacto ambiental y disponibilidad tecnológica en el país.

Con base en la composición del gas de la TEA 2001, que presenta una alta proporción de hidrocarburos livianos como propano y butano (mayores al 50% de la mezcla), se requiere una tecnología que pueda convertir esta energía térmica en electricidad y vapor útil, adaptándose a un perfil de flujo constante y baja presión de suministro.

#### **3.2.1. Enfoque de selección tecnológica basado en la norma ISO 50001:2018**

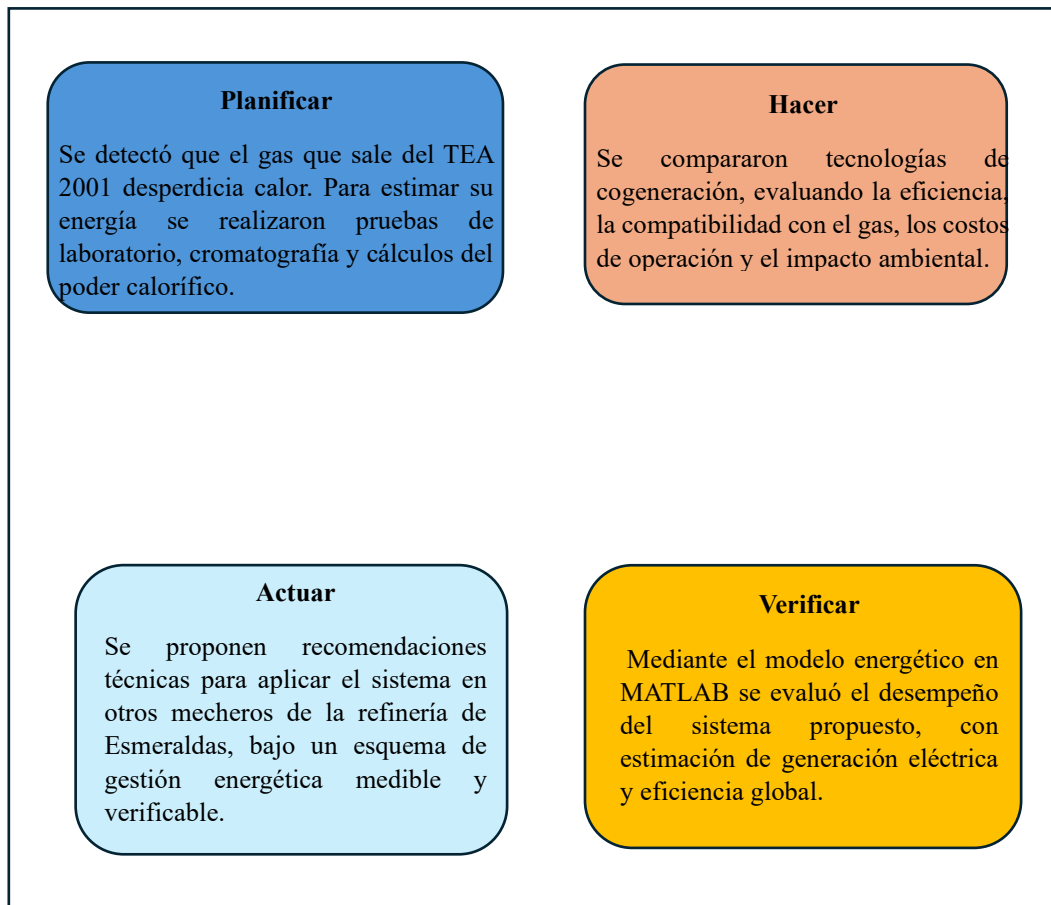
La implementación de un sistema de cogeneración energética en la Refinería de Esmeraldas requiere no solo la elección de equipos técnicamente viables, sino también la incorporación de principios de eficiencia energética sostenida, alineados con normativas internacionales, bajo esta perspectiva se tomó como base metodológica la norma ISO 50001:2018 - Sistemas de gestión de la energía, la cual proporciona un marco estructurado para mejorar de manera continua el desempeño energético de las organizaciones.

La norma se basa en el ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar, una rutina que ayuda a mejorar todo el tiempo pide tomar decisiones sobre energía usando datos reales y análisis de desempeño, y elegir tecnologías que ahorren energía y reduzcan las emisiones.

En esta investigación esos principios se aplican paso a paso en varias fases que se detallan aquí:

**Figura 43**

*Ciclo PHVA aplicado a la investigación*



*Nota.* Elaboración propia

La selección de tecnologías se sustenta en criterios técnicos y en los principios normativos de gestión energética moderna, lo cual fortalece la viabilidad del sistema de cogeneración no solo desde una perspectiva operativa, sino también como parte de una estrategia integral de sostenibilidad y mejora energética institucional

Para cada tecnología se elaboró una matriz comparativa basada en literatura técnica, normativa ISO 50001 y criterios de ingeniería aplicados al caso ecuatoriano.

**Tabla 5***Tecnologías seleccionadas para el sistema de cogeneración*

<b>Componente</b>	Intercambiador de calor tipo carcasa y tubos
	
<b>Principio de funcionamiento</b>	El fluido caliente circula por el interior de los tubos o la carcasa, mientras que el fluido frío circula en el lado opuesto. La energía térmica se transfiere a través de las paredes de los tubos, sin mezcla directa de fluidos.
<b>Material</b>	Acero inoxidable AISI 316 / Acero al carbono con recubrimiento resistente a la corrosión
<b>Superficie de intercambio</b>	50–500 m <sup>2</sup> (según capacidad requerida)
<b>Presión de diseño</b>	10–25 bar
<b>Temperatura de operación</b>	Hasta 500 °C
<b>Eficiencia térmica</b>	Alta (>80%)
Resiste altas temperaturas y es ideal para el aprovechamiento de gases calientes, optimizando la transferencia térmica en el sistema de cogeneración de la refinería	
<b>Componente</b>	Turbina de vapor tipo contrapresión



<b>Principio de funcionamiento</b>	El vapor de alta presión ingresa a la turbina, se expande a través de los álabes y convierte su energía en movimiento rotatorio del eje. En el caso de la contrapresión, el vapor de escape se aprovecha en procesos industriales; en la condensación, se condensa y retorna al ciclo.
<b>Potencia de diseño</b>	5 – 50 MW
<b>Presión de entrada</b>	20 – 90 bar
<b>Temperatura de entrada</b>	350 – 540 °C
<b>Velocidad nominal</b>	3,000 – 10,000 rpm
<b>Eficiencia térmica</b>	Alta (>75%)
<b>Normas aplicables</b>	ASME PTC 6, API 611/612, ISO 3977

La contrapresión permite usar el vapor remanente en procesos industriales, aumentando la eficiencia global del sistema de cogeneración.

<b>Componente</b>	Generador eléctrico tipo síncrono
	
<b>Principio de funcionamiento</b>	<p>El movimiento rotatorio del eje, acoplado directamente a la turbina, genera un campo magnético que induce corriente eléctrica en los devanados del estator.</p> <p>Convertir la energía mecánica proveniente de la turbina de vapor en energía eléctrica utilizable para la refinería o para inyección a la red.</p>
<b>Potencia nominal</b>	5 – 50 MW
<b>Tensión nominal</b>	400 V – 13.8 kV
<b>Frecuencia</b>	50/60 Hz
<b>Eficiencia eléctrica</b>	Muy alta (>95%)
<b>Mantenimiento</b>	<p>Inspección de aislamiento.</p> <p>Lubricación de rodamientos.</p> <p>Control de temperatura y vibraciones.</p>
<b>Ventajas técnicas</b>	<p>Alta eficiencia en conversión de energía.</p> <p>Robustos y confiables para operación continua.</p>

<b>Componente</b>	Condensador tipo Superficie
	
<b>Principio de funcionamiento</b>	El vapor entra en contacto con superficies frías (superficie) o con agua fría directamente (contacto directo), liberando calor latente y cambiando de fase a líquido.
<b>Aplicación específica en Refinería de Esmeraldas</b>	Recuperación de agua del ciclo de vapor. Mejora de eficiencia térmica del sistema.
<b>Presión de operación</b>	0.05 – 0.2 bar abs
<b>Temperatura de condensación</b>	30 – 60 °C
<b>Material</b>	Acero inoxidable / Acero al carbono
<b>Eficiencia térmica</b>	Alta (>85%)
<b>Mantenimiento</b>	Limpieza de superficies de intercambio. Inspección de corrosión.
<b>Componente</b>	Bomba de recirculación tipo centrífuga o multietapa



<b>Principio de funcionamiento</b>	Utiliza un impulsor rotatorio para aumentar la presión y velocidad del fluido, garantizando su circulación en el sistema.
<b>Caudal</b>	10 – 500 m <sup>3</sup> /h
<b>Altura manométrica</b>	20 – 200 m
<b>Potencia de motor</b>	5 – 200 kW
<b>Material</b>	Acero inoxidable / Hierro fundido
<b>Mantenimiento</b>	Lubricación y revisión de sellos mecánicos. Limpieza de filtros y tuberías.
Es esencial para mantener el ciclo cerrado, garantizando el suministro constante de agua.	

*Nota.* Elaboración propia con base en Cruz et al. (2020), Reina-Quiñónez et al. (2018)

La elección de una turbina de contrapresión sobre una de condensación responde a que en una refinería como la de Esmeraldas existen múltiples procesos que requieren vapor a baja presión (calderas, hornos, precalentadores), lo que permite reutilizar directamente el vapor sin desperdiciarlo, además, el gas de la TEA 2001 no requiere sistemas complejos de pretratamiento, lo que facilita su uso en calderas adaptadas a gas combustible.

Por otra parte, el intercambiador de calor carcasa y tubos es ampliamente utilizado en industrias petroquímicas por su alta capacidad de transferencia térmica y resistencia mecánica, lo que lo convierte en la mejor opción para gases calientes con posibles impurezas.

### 3.3 Evaluación del sistema integrado de cogeneración mediante simulación en MATLAB

Una vez caracterizado el potencial energético del gas residual de la TEA 2001 y seleccionadas las tecnologías más adecuadas para su aprovechamiento, se procedió a realizar el dimensionamiento técnico y la simulación computacional del sistema propuesto mediante el software MATLAB R2024b, utilizando su entorno especializado Simscape/Simulink.

El objetivo de esta etapa fue validar la viabilidad operativa del sistema bajo condiciones reales de trabajo de la Refinería Estatal Esmeraldas, para ello, se diseñó un modelo térmico cerrado basado en el ciclo Rankine modificado, utilizando como fuente de energía el flujo constante del gas residual y considerando todos los equipos seleccionados en el análisis comparativo previo: intercambiador de calor, turbina de contrapresión, generador síncrono, condensador de superficie y bomba centrífuga.

#### 3.3.1. Condiciones de operación para la simulación

Para configurar correctamente el modelo de simulación, se emplearon los siguientes parámetros técnicos, derivados de los análisis del Capítulo 3.1 y datos operativos reales proporcionados por la Refinería de Esmeraldas:

**Tabla 6**

*Datos tomados para la simulación*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor estimado</b>	<b>Fuente</b>
Caudal másico del gas residual	3000 kg/h	Datos Refinería de Esmeraldas
Poder calorífico superior (PCS)	49.22 MJ/kg	Calculo capítulo 3.1.8
Energía térmica total disponible	41.02MWh	Calculo propio
Eficiencia del intercambiador	85%	Perry's Handbook
Presión del vapor generado	28 bar	Estándar industrial
Temperatura del vapor	350° C	Supuesto técnico válido
Eficiencia de la turbina	85%	Reina-Quíñonez et al. (2018)
Eficiencia del generador síncrono	95%	Engineering Toolbox

*Nota.* Elaboración propia con base en (MAELIN, 2016)

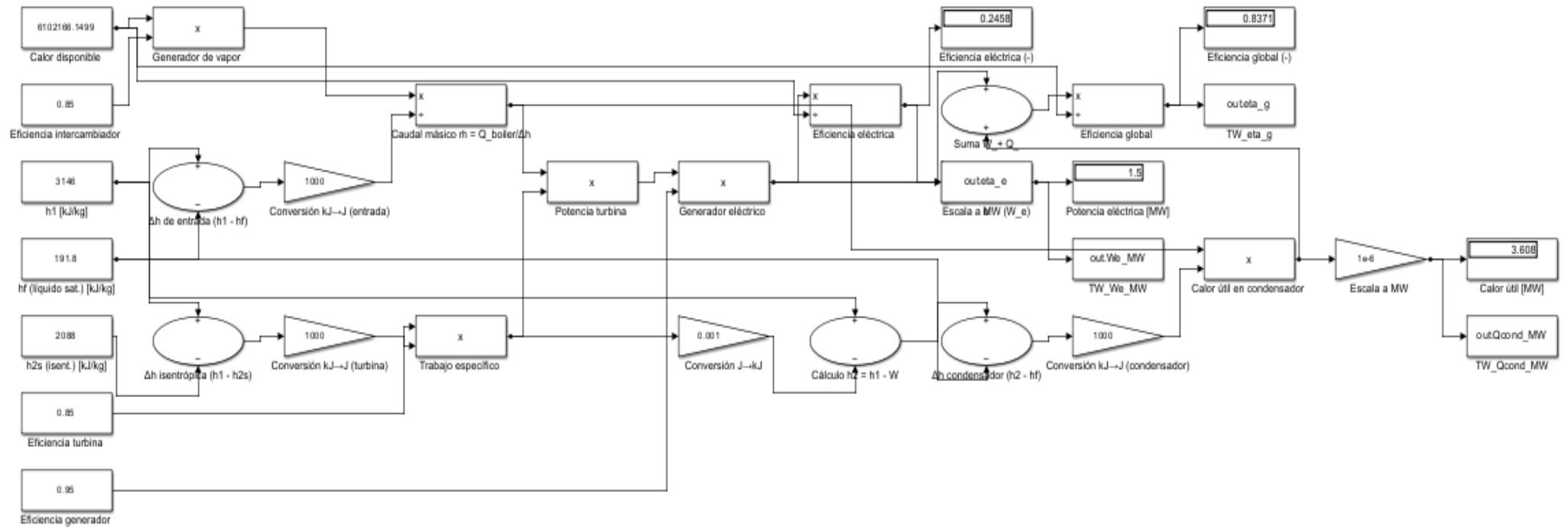
Estos valores permitieron modelar el comportamiento térmico, mecánico y eléctrico del sistema de forma coherente con las condiciones de planta.

### **3.3.2. Descripción del modelo en MATLAB/Simulink**

El modelo se desarrolló en el entorno Simscape Thermal y se estructuró de acuerdo con el siguiente esquema general:

**Figura 44**

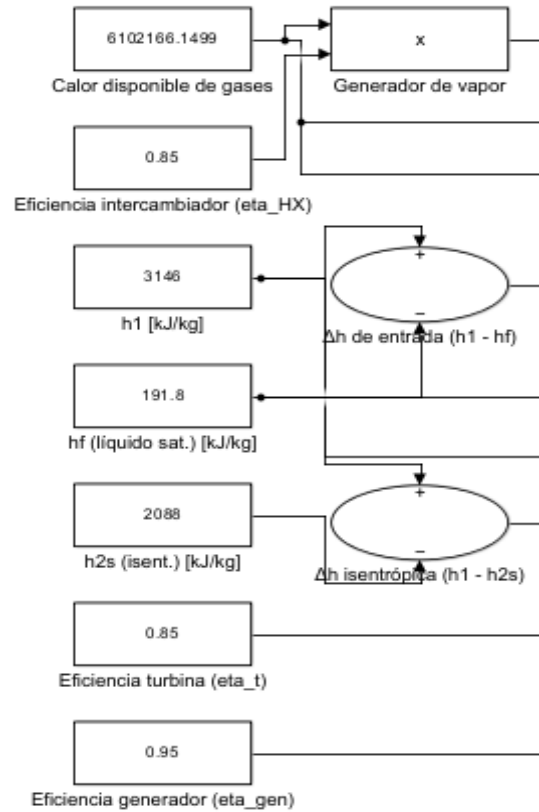
*Simulación completa*



Nota. MATLAB/Simulink

**Figura 45**

*Entrada en Simulink (calor disponible y entalpías)*



*Nota.* MATLAB/Simulink

En esta parte de la simulación se definen los parámetros de entrada necesarios para simular el ciclo Rankine combinado. Los valores corresponden a las propiedades termodinámicas y la eficiencia de los equipos. Las ecuaciones utilizadas fueron:

- **Calor en el generador de vapor**

$$Q_{boiler} = Q_{disp} * \eta_{HXv} \quad (5)$$

Donde:

$Q_{boiler}$  : Calor transferido al fluido del generador de vapor [W].

$Q_{disp}$  : Calor disponible en los gases de combustión [W].

$\eta_{HXv}$ : Eficiencia del intercambiador de calor (85%).

- **Diferencia de entalpia de entrada**

$$\Delta h_{in} = h_1 - h_f \quad (6)$$

Donde:

$\Delta h_{in}$ : Diferencia de entalpia entre vapor y liquido saturado [KJ/Kg].

$h_1$ : 3146  $\rightarrow$  entalpia específica del vapor sobrecalentado [KJ/Kg].

$h_f$ : 191.8  $\rightarrow$  entalpia del líquido saturado [KJ/Kg].

- **Diferencia de entalpia isentrópica (turbina)**

$$\Delta h_s = h_1 - h_{2s} \quad (7)$$

Donde:

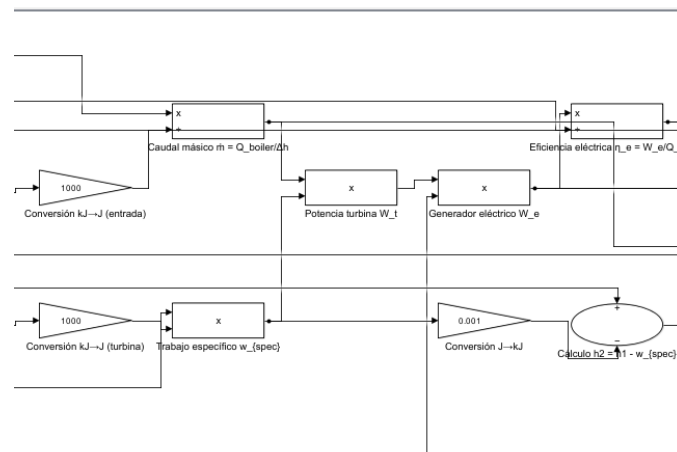
$\Delta h_s$ : Salto entálpico isentrópico [KJ/Kg].

$h_1$ : 3146  $\rightarrow$  entalpia de entrada de vapor [KJ/Kg].

$h_f$ : 2088  $\rightarrow$  entalpia a la salida isentrópica [KJ/Kg].

**Figura 46**

*Turbina y generador en Simulink*



Nota. MATLAB/Simulink

En esta parte se modela la expansión del vapor en la turbina, donde se aprovecha la energía del fluido para producir trabajo mecánico. Posteriormente, mediante el generador, la energía mecánica se convierte en energía eléctrica. Las ecuaciones utilizadas fueron:

- **Trabajo específico del vapor**

$$w_{spec} = \eta_t * \Delta h_s * 1000 \quad (8)$$

Donde:

$w_{spec}$ : Trabajo específico real del vapor [J/Kg].

$\eta_t$ : 85% eficiencia de la turbina.

Factor 1000 → conversión de KJ/Kg a J/Kg.

- **Potencia de la turbina**

$$W_t = m * w_{spec} \quad (9)$$

Donde:

$W_t$ : Potencia mecánica de la turbina [W].

$m$ : Caudal masico del vapor [Kg/s].

$w_{spec}$ : Trabajo específico [J/Kg].

- **Potencia eléctrica generada**

$$W_e = \eta_{gen} * W_t \quad (10)$$

Donde:

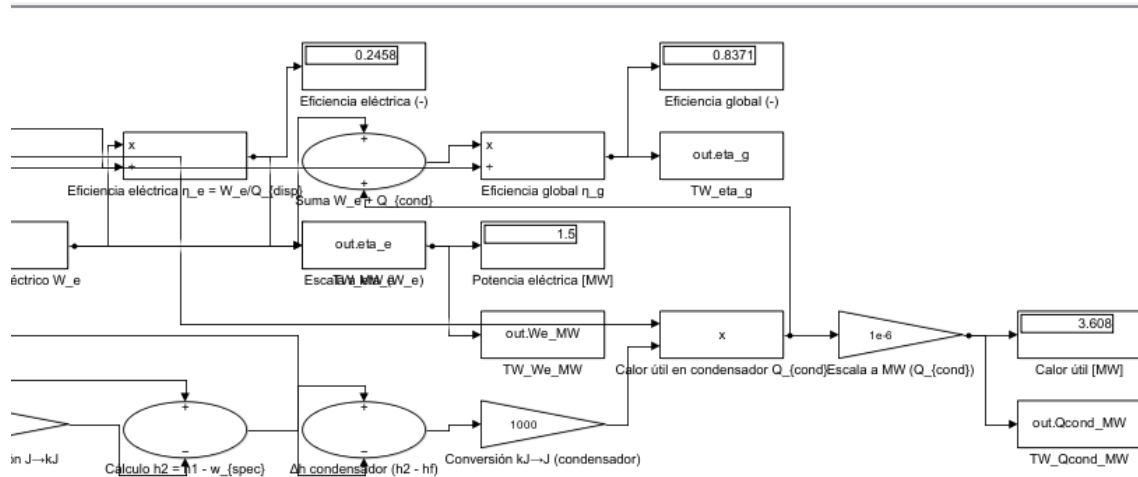
$W_e$ : Potencia eléctrica producida [W].

$\eta_{gen}$ : 95% eficiencia del generador eléctrico.

$W_t$ : Potencia mecánica [W].

**Figura 47**

*Condensador y cálculo de eficiencias en Simulink.*



Nota. MATLAB/Simulink

Aquí se evalúa el estado del vapor a la salida de la turbina ( $h_2$ ), el calor útil recuperado en el condensador y las eficiencias eléctrica y global del sistema de cogeneración. Las ecuaciones utilizadas fueron:

- **Cálculo de entalpía de salida de la turbina**

$$h_2 = h_1 - \frac{W_{spec}}{1000} \quad (11)$$

Donde:

$h_2$ : Entalpía real de salida de la turbina [KJ/Kg].

$h_1$ : Entalpía de entrada [KJ/Kg].

$W_{spec}$ : Trabajo específico real [J/Kg].

- **Calor útil recuperado en el condensador**

$$Q_{cond} = m * \Delta h_{cond} * 1000 \quad (12)$$

Donde:

$Q_{cond}$ : Calor recuperado [W]

$m$ : Caudal masico de vapor [Kg/s]

- **Eficiencia eléctrica del sistema**

$$\eta_e = \frac{W_e}{Q_{disp}} \quad (13)$$

Donde:

$\eta_e$ : Eficiencia eléctrica.

$W_e$ : Potencia eléctrica generada [W].

$Q_{disp}$ : Calor disponible en gases [W].

- **Eficiencia global de cogeneración**

$$\eta_g = \frac{W_e + Q_{cond}}{Q_{disp}} \quad (14)$$

Donde:

$\eta_g$ : Eficiencia global del sistema de cogeneración.

$W_e$ : Potencia electrica [W].

$Q_{cond}$ : Calor util recuperado [W]

### **Descripción de los bloques principales**

- Se inicia con la entrada térmica en este caso el gas residual, que representa la energía que existe proveniente de gas de la TEA 2001, caracterizada por su caudal y poder calorífico.
- Intercambiador de calor que transfiere el calor del gas al fluido de trabajo (agua), generando vapor presurizado.
- Turbina de contrapresión que expande el vapor para obtener energía mecánica rotacional.
- Generador síncrono, que está acoplado al eje de la turbina, transforma la energía mecánica en energía eléctrica alterna.
- Condensador de superficie que enfría el vapor de salida de la turbina para convertirlo nuevamente en agua líquida.
- Bomba centrífuga que recircula el agua hacia el intercambiador, cerrando el ciclo.

Todos los bloques fueron parametrizados en función de los datos reales de operación y los cálculos termodinámicos previos.

### 3.3.3. Resultados de la simulación

El modelo fue ejecutado en estado estacionario para evaluar el comportamiento energético global del sistema, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 7**

*Datos tomados para la simulación*

Componente físico real	Nombre del bloque en Simulink	Ubicación en la biblioteca
Entrada de energía térmica (gas residual)	Ideal Heat Flow Source	Simscape > Foundation > Thermal > Heat Flow
Intercambiador de calor	Shell and Tube Heat Exchanger (2P)	Simscape > Thermal > Two-Phase Fluid > Heat Exchangers
Turbina de contrapresión	Steam Turbine (2P)	Simscape > Thermal > Two-Phase Fluid > Machines
Generador eléctrico síncrono	Synchronous Machine	Simscape > Electrical > Specialized Power Systems
Condensador de superficie	Condensing Heat Exchanger (2P)	Simscape > Thermal > Two-Phase Fluid > Heat Exchangers
Bomba de recirculación	Two-Phase Fluid Pump (Controlled Mass Flow Rate)	Simscape > Thermal > Two-Phase Fluid > Machines
Conexiones térmicas / fluidas / mecánicas	Pipe (2P), Thermal Reference, Mechanical Rotational Reference	Varios
Control de flujo o presión	Pressure Source, Mass Flow Rate Source	Simscape > Thermal > Two-Phase Fluid
Medición de variables	Scope, PS-Simulink Converter, Sensor Blocks	Simscape Utilities + Foundation Blocks

*Nota.* MATLAB/Simulink

**Tabla 8**

*Resultados obtenidos en la simulación*

Variable simulada	Resultado
Potencia eléctrica generada	1,5 MW
Calor útil aprovechado	3,6 MW
Eficiencia eléctrica	25%
Eficiencia térmica global	84%

*Nota.* Elaboración propia con base en MATLAB/Simulink

La evaluación mediante simulación computacional ha confirmado la viabilidad técnica y energética del sistema de cogeneración propuesto, los valores obtenidos respaldan que este diseño no solo es funcional bajo condiciones reales de planta, sino que también representa una oportunidad estratégica para la Refinería de Esmeraldas en términos de eficiencia, ahorro energético y sostenibilidad ambiental.

### 3.4. Estimación de costos de implementación

A partir de cotizaciones referenciales, literatura técnica y costos de mercado 2024 en Ecuador y LATAM, se estimaron los siguientes costos para la implementación del sistema de cogeneración:

**Tabla 9**

*Costos de los componentes de cogeneración*

<b>Componente</b>	<b>Costo</b>	<b>Fuente</b>
Intercambiador de calor (carcasa y tubos)	\$ 9320,40	Cotización referencial de mercado (2024)
Turbina de contrapresión (1 - 2 MW)	\$ 300000,00	Cotización referencial (2024)
Generador síncrono trifásico	\$90,000	ABB / WEG
Condensador de superficie	\$60,000	CATSA / API 614
Bomba centrífuga multietapa (para alimentación de caldera)	\$1903,00	Cotización referencial (2024)
Instrumentación y control	\$30,000	Estimación técnica
<b>Total</b>	<b>\$ 508350,40</b>	

**Fuente:** Elaboración propia

Para efectos del análisis financiero se toma un valor conservador de **\$ 508350,40 USD**

### 3.4.1. Cálculo del retorno de inversión (ROI)

**Energía eléctrica anual:**

$$E_{anual} = 1,5 \text{ MW} \times 8,000 \text{ h} = 12\,000 \frac{\text{MWh}}{\text{año}} = 12\,000\,000 \text{ kWh/año} \quad (15)$$

$$\text{Ahorro económico} = 12\,000\,000 \text{ kWh} \times 0,09 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} = 1\,080\,000 \text{ USD/año} \quad (16)$$

Al 90%

$$\text{Beneficio anual} = \mathbf{1\,080\,000} \times 0,09 = \mathbf{972\,000} \text{ USD/año} \quad (17)$$

La energía eléctrica anual generada por el sistema se calculó mediante el producto de la potencia eléctrica neta y las horas de operación anuales.

**El retorno de inversión:** Este cálculo se hace mediante la aplicación de la ecuación 4.

$$ROI = \frac{\text{Beneficio anual neto} - \text{Costo de inversión}}{\text{Costo de inversión}} \times 100$$
$$ROI = \frac{972\,000 - 508\,350,40}{508\,350,40} \times 100 = 91,2 \%$$

El 91,2% que se obtuvo mediante el cálculo del retorno de la inversión nos da a entender que por cada dólar invertido en el sistema de cogeneración la Refinería de Esmeraldas tendrá un retorno de 0,91 dólares en un año.

Esto implica que la inversión podría recuperarse en menos de 1 año, específicamente en 6,3 meses, bajo las condiciones de operación (8 000 h/año al 90 % de disponibilidad y tarifa de 0,09 USD/kWh).

Estos resultados confirman que el proyecto es financieramente viable y rentable.

### 3.4.4. Simulación de emisiones evitadas (MATLAB)

Para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas, se consideró la combustión de la mezcla gaseosa y sus productos de reacción. MATLAB fue usado para programar la siguiente expresión:

$$CO_2 = \sum(\text{Fracción molar} * \text{moles combustibles} * \text{kgCO}_2/\text{mol}) \quad (18)$$

Con base a la composición del gas, se estimaron:

**Tabla 10**

*Datos para el cálculo de emisiones*

Componente	Fracción molar	Emisión CO <sub>2</sub> (kg/kg gas)
Propano	0.267	1.61
Butano	0.294	1.74
Etano	0.102	1.61
Metano	0.153	1.375
Otros	0.184	0.8 - 1
Total	1	~1.6 kg CO <sub>2</sub> /kg gas

*Nota.* Elaboración propia con base en MATLAB

Multiplicado por el caudal másico:

$$\text{Emisiones evitadas} = 3000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 1.6 \frac{\text{CO}_2 \text{kg}}{\text{gas}} = 4800 \text{ kg CO}_2/\text{h} \quad (19)$$

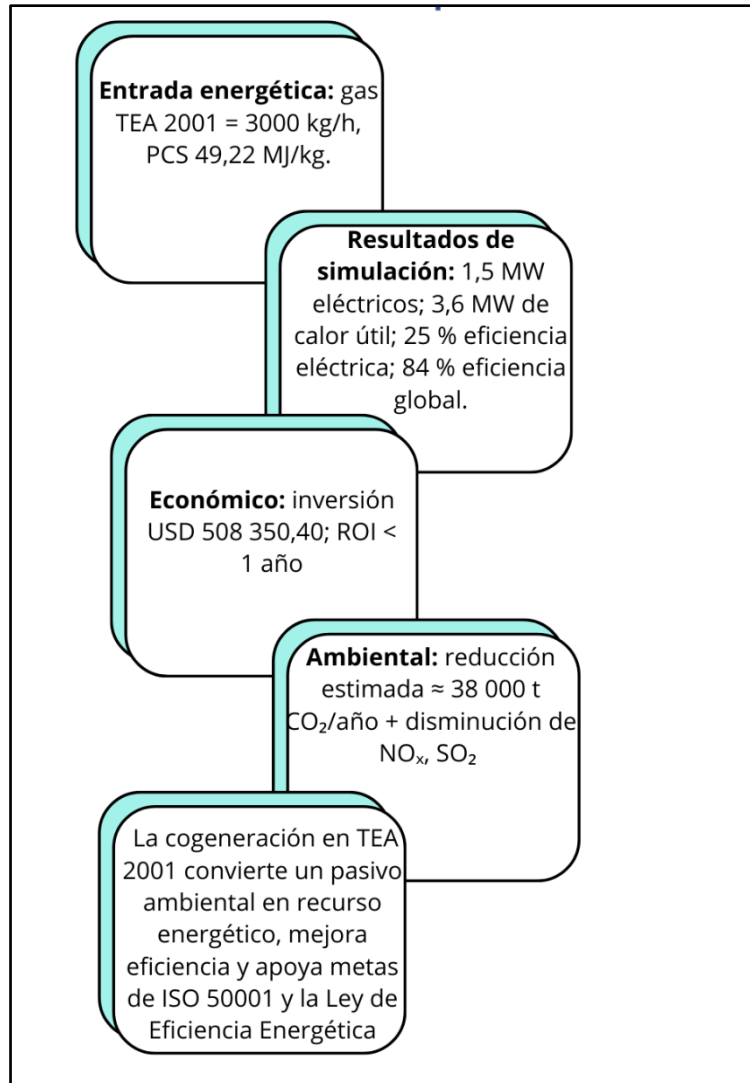
En un año de operación (8000 h/año):

$$\text{Total anual} \approx 38\,400\,000 \text{ kg CO}_2 = 38,400 \text{ t CO}_2/\text{año}$$

El análisis técnico-económico y ambiental demuestra que la implementación del sistema propuesto de cogeneración es altamente viable y sostenible, la inversión se recupera rápidamente gracias al ahorro en energía eléctrica y combustibles, mientras que el impacto ambiental es significativo al evitar más de 38,000 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>, esto convierte el proyecto en una estrategia concreta de transición energética para la Refinería Estatal Esmeraldas, compatible con los objetivos nacionales de descarbonización y eficiencia energética.

## Figura 48

### Resumen del capítulo 3



Nota. Elaboración propia

## CAPITULO 4.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

- Se determinó que el gas residual de la TEA 2001 tiene un alto potencial energético, en donde su poder calorífico superior (PCS) es de 49.08 MJ/kg, como resultado de una composición rica en hidrocarburos como el propano (26.7%) y butano (29.4%), el análisis se realizó mediante la conversión molar a fracción másica y aplicación de fórmulas termoquímicas documentadas en literatura técnica.
- Tras analizar diversas tecnologías de cogeneración y aplicar criterios establecidos por la norma ISO 50001, se identificó que el conjunto óptimo de equipos está conformado por: intercambiador de calor tipo carcasa y tubos, turbina de contrapresión, generador síncrono, condensador de superficie y bomba centrífuga de recirculación, esta configuración permite aprovechar el calor del gas residual de manera eficiente, reutilizar el vapor generado en procesos industriales y cumplir con los principios de eficiencia energética y mejora continua
- La simulación del sistema propuesto en MATLAB/Simulink evidenció que, bajo condiciones reales de operación, es posible generar 1.5 MW de energía eléctrica y 3.6 MW de calor útil con una eficiencia térmica global de 84%, estos resultados confirman que el sistema de cogeneración diseñado no solo es técnicamente viable, sino que también mejora sustancialmente la eficiencia energética de la refinería, reduciendo las pérdidas térmicas y promoviendo el uso responsable del recurso energético residual.
- El análisis financiero estimó un retorno de inversión (ROI) del 91,2%, con un ahorro energético anual de \$ 972000 USD, lo que implica que el sistema podría

recuperar su inversión en menos de un año, además la simulación de emisiones evitadas mostró que la implementación del sistema permitiría reducir aproximadamente 38,000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, además de disminuir emisiones de NO<sub>x</sub> y partículas, esto convierte al sistema en una alternativa ambientalmente responsable que contribuye a los objetivos de sostenibilidad de la refinería y al cumplimiento de las normas ISO 50001.

## RECOMENDACIONES

- Ejecutar una prueba piloto del sistema de cogeneración en un circuito controlado, utilizando el gas residual de la TEA 2001, con el fin de validar en campo los valores obtenidos por simulación y ajustar parámetros operativos reales antes de una implementación a escala industrial.
- Capacitación continua y mantenimiento preventivo: Dado el carácter altamente técnico y especializado de las operaciones, se aconseja fortalecer programas permanentes de capacitación para el personal, junto con rigurosos planes de mantenimiento preventivo de los equipos, la formación continua de operadores y técnicos en las mejores prácticas de operación, seguridad y mantenimiento asegurará que el personal conozca a fondo los equipos y procedimientos, esto permite identificar puntos de falla potenciales y aplicar mantenimiento preventivo periódico, manteniendo los equipos en condiciones óptimas de funcionamiento. De igual modo, entrenamientos en nuevas tecnologías, por ejemplo, sistemas de control, análisis de datos de proceso, elevarán la competencia técnica del equipo humano, reduciendo la probabilidad de errores operativos, en cuanto al mantenimiento, establecer rutinas calendarizadas de inspección, lubricación, calibración y reemplazo de partes desgastadas evitará paros imprevistos y prevendrá accidentes.
- Es importante revisar constantemente la composición del gas residual, ya que la mezcla de gases que provienen de la refinación puede variar bastante con el tiempo. Por eso, se recomienda realizar análisis regulares, como cromatografía o calorimetría, que permitan conocer tanto su composición como su poder calorífico. Asegurando un mejor control del proceso y un aprovechamiento más eficiente del recurso para futuros procesos o proyectos dentro de la industria.

## REFERENCIAS

- Agencia de sostenibilidad energetica. (2025). *¿Qué es Cogeneración?*  
<https://www.cogeneraeficiente.cl/que-es-cogeneracion/>
- Almeida, A., Fajardo, P., Maldonado, A., Rodríguez, M., De Marchi, M., Fabris, G., De la Fera, G., Pappalardo, E., & Ruggier, L. (2020). *Informe mecheros en Ecuador*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/[https://agenciaecologista.info/wp-content/uploads/2020/01/INFORME\\_MECHEROS\\_envio.pdf](https://agenciaecologista.info/wp-content/uploads/2020/01/INFORME_MECHEROS_envio.pdf)
- Álvarez, J. G., Armero, J. M., & Urrutia, C. A. (2020). Control de temperatura en intercambiadores de calor tipo coraza-tubo: una revisión realizada a la industria. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-83672020000100041&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-83672020000100041&script=sci_arttext)
- Arteaga, A., Brito, Á., Cantos, M., & Gilbert, E. (2016). Selección del esquema de cogeneración para una industria de pescado enlatado. Caso Ecuador. *Revista Riemat*, 1. <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Riemat/article/view/926/824>
- Becerra, S., E.Paichard, Sturma, A., & L.Maurice. (2013). *Living with oil contamination in Ecuador: social perceptions of health risks and coping capacities*. 102–120. <https://revistaliderchile.ulagos.cl/index.php/liderchile/article/view/2396/3340>
- Bernardi, E. (2020). *Diseño de Observadores para la Detección y Diagnóstico de Fallas Aplicados a la Industria de Procesos*. [https://www.researchgate.net/figure/Figura-C2-Diagrama-del-proceso-de-un-intercambiador-de-calor\\_fig9\\_347963686](https://www.researchgate.net/figure/Figura-C2-Diagrama-del-proceso-de-un-intercambiador-de-calor_fig9_347963686)
- Cabrera, M., Montenegro, L., & Guanulema, J. (2021). Análisis de la Correlación entre las Emisiones Gaseosas y el Desempeño Energético de Fuentes Fijas de Combustión en Ecuador. *Revista Politécnica*, 48(1), 43–50. <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n1.04>
- Cruz, J., Díaz, H., Gámez, C., Guerrero, L., Mar, R., Salas, P., & Sánchez, G. (2020). *Cogeneración de Energía*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/[https://dlwqtxts1xzle7.cloudfront.net/62205705/Proyecto\\_TPM\\_Real20200226-26100-1o76g27-libre.pdf?1582738735=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DProyecto\\_TPM\\_Real.pdf&Expires=1736824423&Sig](https://dlwqtxts1xzle7.cloudfront.net/62205705/Proyecto_TPM_Real20200226-26100-1o76g27-libre.pdf?1582738735=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DProyecto_TPM_Real.pdf&Expires=1736824423&Sig)
- Delgado, D. (2024). *Análisis termodinámico de un ciclo Rankine orgánico usando biogás generado por digestión anaerobia de residuos de cosecha de banano* [Universidad de America]. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9678>
- Durán, A. (2007). *DEGRADACIÓN BIOLÓGICA DE AMINAS GASTADAS S DE LOS PROCESOS DE ENDULZAMIENTO PROVENIENTE DE GAS DE UNA REFINERÍA* [Universidad Nacional Autónoma de México]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2026/maciasontiveros.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- EP Petroecuador. (2022). *RESUMEN EJECUTIVO DE LAS BASES DEL CONCURSO PÚBLICO INTERNACIONAL DE OFERTAS PARA EL PROYECTO DE*

*GESTIÓN CONJUNTA PARA LA MODERNIZACIÓN, AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN INTEGRAL DE LA REFINERÍA ESMERALDAS E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE ALTA CONVERSIÓN, CON FINANC.*

chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/11/Presentacion-tecnica-Refineria-Esmeraldas.pdf

- EP Petroecuador. (2023). *Refinería Esmeraldas: Esquema de Refino*.  
<https://www.eppetroecuador.ec/?p=22744>
- Estrada Chavira, M. E., Alvarado Raya, H. E., Lozada Ruiz, J. I., & Perez Macias, M. A. (2020). Identificación del mercado de bonos de carbono en México para proyectos industriales. *Semestre Económico*, 9(2), 58–62.  
<https://doi.org/10.26867/se.2020.v09i2.106>
- Flores, M. (2023). *Cambio climático y mercados de carbono en el Ecuador: balance y perspectivas* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21534>
- Frailé, D. (2008). *Cogeneración: aspectos tecnológicos*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/componente45275.pdf
- Frigolutions. (2020). *Rendimiento: ¿Qué es y cómo calcularlo?* | *Electricidad*.  
<https://www.frigolutions.com/2020/05/rendimiento-que-es-y-como-calcularlo.html>
- García, A. (2025). *Los Ciclos Rankine Orgánicos: Estudio de Mercado y Análisis de Ciclo de Vida* [Universidad Zaragoza]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://zagan.unizar.es/record/152540/files/TAZ-TFG-2025-038.pdf?version=1
- García, L., & Gonzalez, L. (2022). *Uso de la tecnología convencional para la reducción de agua de consumo y gases de efecto invernadero a través de la recirculación del agua residual no doméstica: Piloto Industrial en Colombia. Economía Circular*.  
file:///C:/Users/Yuly Salazar/Downloads/Dialnet-UsodeLaTecnologiaConvencionalParaLaReduccionDeAgua-8714774 (1).pdf
- Gómez, J. (2021). *Eficiencia energética en el sector industrial*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.orquestra.deusto.es/imagenes/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/210005-Eficiencia-Energética-Sector-Industrial-INFORME-COMPLETO-.pdf
- González, A., & Cataldo, J. (2024). *Huella de carbono de refinerías* [Universidad de la república de Uruguay]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://core.ac.uk/download/pdf/634849439.pdf
- González, J. (2009). *Energías Renovables*. [https://www.researchgate.net/figure/Figura-114-Turbina-de-vapor\\_fig10\\_267727075](https://www.researchgate.net/figure/Figura-114-Turbina-de-vapor_fig10_267727075)
- Henao-Espinoza, J. A., Palacios-García, L. F., Bedoya-Fuentes, A. O., Ramírez-Toro, J. A., & Navarrete-Villacis, M. V. (2018). Importancia de las plantas de cogeneración. *Polo Del Conocimiento*, 2(12), 124.  
<https://doi.org/10.23857/pc.v2i12.416>

- ISO. (2018). *Sistemas de gestión de la energía — Requisitos con orientación para su uso*. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:50001:ed-2:v1:es>
- Juan, N., Merck, B., & Carla, G. (2023). *La contaminación ambiental por quema del gas natural: un problema social desde una óptica legal*. file:///C:/Users/Yuly Salazar/Downloads/La+contaminacion+ambiental+por+quema...+Juan+E.+Núñez+et+al.pdf
- Macias, R. (2007). *Degradación biológica de aminos gastadas provenientes de los procesos de endulzamiento de gas de una refinería* [Universidad nacional autónoma de México]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54043084/maciasontiveros-libre.pdf?1501710074=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPROGRAMA\_DE\_MAESTRIA\_Y\_DOCTORADO\_EN\_INGE.pdf&Expires=1737046837&Sign
- MAELIN. (2016). *Estudio de factibilidad para la recuperación de gases de quema de la refinería de Esmeraldas, Ecuador*. file:///C:/Users/Yuly Salazar/OneDrive/Escritorio/TESIS MAESTRIA/INFORMACION PETRO/Feasibility Study Report for the Esmeraldas Refinery FGR Project\_Rev. 0.pdf
- Martinez, F. (2022). La eficiencia energética y el papel del mantenimiento en la misma. *Scielo*. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59012022000200010&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59012022000200010&script=sci_arttext&tlng=en)
- Ministerio de energía y minas. (2019). *Ley organica de eficiencia energetica*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2022/12/20190319-S\_R\_O\_449\_19\_MARZO\_LEY-ORGANICA-DE-EFICIENCIA-ENERGETICA.pdf
- Montoya, S., & Páez, C. (2012). *Documentación de la técnica de cromatografía de gases en el análisis de hidrocarburos alifáticos en aguas residuales* [Universidad tecnológica de Pereira]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/6aee81c6-27fb-40aa-80e3-77cb81d5130b/content
- Moreira, P. (2022). *ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE PRÓXIMO A LAS CHIMENEAS DE LA REFINERÍA ESMERALDAS, MEDIANTE EL MODELO DE DISPERSIÓN PLUMA*. [Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/fc6c3af1-ed06-49e3-b350-6e7692cd4a42/content
- Núñez Sanabria, J. E. (2023). La imputación objetiva aplicada a los delitos contra el medio ambiente, en especial a la quema de gas natural. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v11i1.3826>
- Olga, Q., Calderón, F., López, F., Ronquillo, S., Fierro, J., Terán, W., Benítez, J., & Revelo, W. (2023). *Valoración ambiental del azufre en los puertos de Guayaquil y Esmeraldas* (J. Bladimir (ed.); Primera). file:///C:/Users/Yuly Salazar/Downloads/Dialnet-ValoracionAmbientaldelAzufreEnLosPuertosDeGuayaqui-926940.pdf
- Olivo. (2025). *Balance termico*. <https://www.olivo-logistics.com/es/glosario/balance->

termico/

- Organización de Naciones Unidas. (1998). *Protocolo de Kyoto [De la Convención Marco sobre el Cambio Climático]*. observatoriop10:  
<https://observatoriop10.cepal.org/es/tratados/protocolo-kyoto-laconvencion-marco-cambio-climatico>
- Ortiz, H. (2011). *ESTUDIO DE LOS IMPACTOS EN LA SALUD DE LOS MORADORES DEL BARRIO PROPICIA I POR LA DESCARGA DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA REFINERÍA ESMERALDAS E INUNDACIONES PROVOCADAS POR EL RÍO TEAONE*.
- Pahuanquiza, J. (2015). *Dispositivos electrónicos utilizados en generadores eléctricos* [Universidad Politécnica Salesiana]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7995/6/UPS - KT00978.pdf>
- Pazuelos, E. (2008). *El mercado de petróleo, un mercado financiarizado*. 439 a 474. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://unterseccionalroca.org.ar/imagenes/documentos/leg/Palazuelos Cap XV El mercado de petroleo un mercado financiarizado.pdf>
- Plazas, M. (2024). *Diseño de un sistema de Tea para un campo petrolero colombiano de acuerdo con la norma estándar API-521* [Universidad Industrial de Santander]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/50479d6a-5eeb-4c04-90d5-c3f33390ed92/content>
- Pro, M. (2011). *Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diésel con contenido ultra bajo de azufre*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/[https://theicct.org/sites/default/files/ICCT\\_RefiningTutorial\\_Spanish.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://theicct.org/sites/default/files/ICCT_RefiningTutorial_Spanish.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- QuimiNet. (2007). Historia de la cromatografía de gases. *Marketizer*.  
<https://www.marketizer.com/articulos/historia-de-la-cromatografia-de-gases-20851.htm>
- Quiñónez, B. F. C., Ortiz, N. P. V., De Souza, R. C. U., Quiñónez, L. V., Ponce, J. D. O., Peralta, A. J. M., & Bautista, J. D. M. (2022). Mejoras para la eficiencia energética de la Central Térmica Esmeraldas I / Improvements for the energy efficiency of the Esmeraldas I Thermal Power Plant. *Brazilian Journal of Development*, 8(1), 6978–6991. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n1-471>
- Raiger, Laura ; López, N. (2009). *Los biosurfactantes y la industria petrolera*. 1666–7948. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/84389>
- Ramírez, Y. (2018). *Estrategias para la implementación de la cogeneración para un sistema de gestión de la energía en Colombia* [Universidad de America].  
<http://52.0.229.99/handle/20.500.11839/7128>
- Reina-Quiñónez, F. M., Vizcaíno-Valencia, P. R., Aguilar-Mora, M. L., & Mera-Mosquera, A. R. (2018). Principales características de las plantas de cogeneración. *Polo Del Conocimiento*, 2(12), 113. <https://doi.org/10.23857/pc.v2i12.415>

- Revuelta Ruiz, J. (2023). *Cálculo y diseño del condensador de la turbina principal de propulsión de un buque LNG*.  
<https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/30688>
- Rocha-Hoyos, J. (2008). “*DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE ENTRENAMIENTO EN LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN Y DE ENCENDIDO DEL VEHÍCULO CHEVROLET SUPER CARRY 1L. DEL LABORATORIO DE MOTORES DIESEL - GASOLINA.*”  
[https://www.researchgate.net/figure/Figura-247-Diagrama-electrico-del-generator-de-impulsos-de-induccion-de-encendido\\_fig35\\_309350889](https://www.researchgate.net/figure/Figura-247-Diagrama-electrico-del-generator-de-impulsos-de-induccion-de-encendido_fig35_309350889)
- san Carlos. (2023). *INGENIO SAN CARLOS PRIMERA EMPRESA ECOEFICIENTE DEL ECUADOR QUE APORTA A LA SEGURIDAD ENERGÉTICA DEL PAÍS CON SU PROYECTO DE COGENERACIÓN ELÉCTRICA DESDE EL 2004*.  
<https://www.sancarlos.com.ec/ingenio-san-carlos-primera-empresa-ecoefficiente-del-ecuador/>
- Sanaguano, E. (2012). *Mantenimiento de tanques de almacenamiento en la refinería estatal Esmeraldas* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://dspace.esoch.edu.ec/bitstream/123456789/3064/1/25T00198.pdf
- Segundo, M. (2024). *Determinación del nivel de corrosión de naftas y gas licuado de petróleo* [Universidad Autónoma del estado de México]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/141739/TESIS\_Naftas\_y\_Gas\_LP\_IPQ\_MarioII\_RI\_25Nov2024.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sergio, Botía ; César, G. (2019). *Estudio para la cogeneración de energía eléctrica en las estaciones de producción de hidrocarburos*. [Universidad distrital Francisco José de Caldas]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/d3f64a16-b43b-4702-aa67-badde271d057/content
- Simbaña, E., Coronel, C., Guasumba, J., & Calero, D. (2022). Carburadores vs inyectores, semejanzas y diferencias entre estos elementos del sistema de combustión. *Polo Del Conocimiento*, 7. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i4.3829>
- Steeve, A. (2024). *Factibilidad de cogeneración térmica de gas residual mechero Refinería La Libertad*. [Universidad Estatal de la Península de Santa Elena]. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/11062>
- Stream. (2025). *Guía de solución de problemas de la bomba de circulación*. <https://www.streampumps.es/pump-troubleshooting/circulator-pump-troubleshooting.html>
- Technologies, K. A. (2013). *Revisión general de utilidades*. <https://es.scribd.com/document/754783350/Revision-General-de-Utilidades>
- Tecnatom. (2018). *Evaluación Técnica Operacional de Proyectos Gestionados por la Empresa Pública de Hidrocarburos de Ecuador*. <https://www.comunicacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/01/PNUD-REFINERIA-ESMERALDAS-compilado-1pdf.pdf>
- Tepan-Villa, D., & Molina-Torres, M. (2024). Evaluación de la efectividad de los

instrumentos legales para la protección de la naturaleza. *593 Digital Publisher CEIT*, 9(6), 356–371. <https://doi.org/10.33386/593dp.2024.6.2744>

Thermal, I. (2018). *¿Qué es el condensador de superficie y el condensador de chorro?* <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-condensador-de-superficie-y-el-condensador-de-chorro-definicion/>

Tixi, H., & Barahona, N. (2019). SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ENDULZAMIENTO DE GAS NATURAL USANDO SOLUCIÓN ACUOSA DE MONOETANOLAMINA. *Perfiles*, 2(22), 56–63. <https://doi.org/10.47187/perf.v2i22.63>

Valencia, M. (2024). *Revisión bibliográfica de los materiales de ingeniería usados en la fabricación de turbinas de vapor y sus fallas comunes en los Alabes* [Universidad del Atlántico]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://52.4.66.61/bitstream/handle/20.500.12834/2100/5 TG MIGUEL VALENCIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Valencia, S. (2024). *EFICIENCIA Y RENDIMIENTO EN EQUIPOS TÉRMICOS: IMPORTANCIA DEL COP*. <https://mascentigrados.com/eficiencia-y-rendimiento-en-equipos-termicos-importancia-del-cop/>

## ANEXOS

### Figura 49

*Programación para emisiones de CO<sub>2</sub>*

```
% COMPOSICIÓN MOLAR DEL GAS RESIDUAL

componentes = {'CH4', 'C2H6', 'C3H8', 'C4H10', 'C4H10_iso', 'H2S', 'otros'};
fraccion_molar = [0.153, 0.102, 0.267, 0.294, 0.127, 0.031, 0.026]; % debe
sumar 1
masa_molar = [16.04, 30.07, 44.10, 58.12, 58.12, 34.08, 45.0]; % g/mol
CO2_por_mol = [1, 2, 3, 4, 4, 1, 2]; % moles de
CO2 producidos por mol

% CONSTANTES
kg_CO2_por_mol = 44.01; % masa molar del CO2
caudal_gas = 3000; % kg/h

% Calcular masa molar promedio del gas
masa_total = sum(fraccion_molar .* masa_molar);
fraccion_masica = (fraccion_molar .* masa_molar) / masa_total;

% Calcular emisión de CO2 por kg de gas quemado
CO2_kg_por_kg = sum(fraccion_masica .* CO2_por_mol * kg_CO2_por_mol);

% Emisión total por hora
CO2_kg_hora = caudal_gas * CO2_kg_por_kg;

% Emisión total anual (suponiendo 8000 h/año)
CO2_ton_anual = CO2_kg_hora * 8000 / 1000;

% Mostrar resultados
fprintf('Emisión de CO2: %.2f kg/h\n', CO2_kg_hora);
fprintf('Emisión de CO2 anual: %.2f toneladas/año\n', CO2_ton_anual);
```

*Nota.* Elaboración propia

**Figura 50**

*Tambor separador de líquidos (Knockout Drum) Y-V2001 de la línea de flare TEA 2001*



*Nota.* Tomado de (MAELIN, 2016)

**Figura 51**

*Mecheros TEA 2001, 2002 y 2003 de la Refinería de Esmeraldas*



*Nota.* Tomado de (MAELIN, 2016)