



**UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE  
INGENIERO INDUSTRIAL**

**“VIABILIDAD DE LA SUSTITUCIÓN DE BÚNKER POR GLP EN  
CALDEROS INDUSTRIALES: ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN  
ENERGÉTICA Y AMBIENTAL EN UNA EMPRESAS DE MANTA.”**

**Autor:**

**Ider Isrrael Pérez Macías.**

**Tutor de Titulación:**

**Ing. Pablo Horacio Hidrovo Alcívar, Mg.**

**Manta - Manabí - Ecuador**

**2026-1**



**UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**“VIABILIDAD DE LA SUSTITUCIÓN DE BÚNKER POR GLP EN CALDEROS  
INDUSTRIALES: ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA Y  
AMBIENTAL EN UNA EMPRESAS DE MANTA.”**

Sometida a consideración del Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, como requisito para obtener el título de:

**INGENIERO INDUSTRIAL**

Aprobado por el Tribunal Examinador:

---

DECANO DE LA FACULTAD  
Ing.

---

DIRECTOR  
Ing.

---

JURADO EXAMINADOR

---

JURADO EXAMINADOR

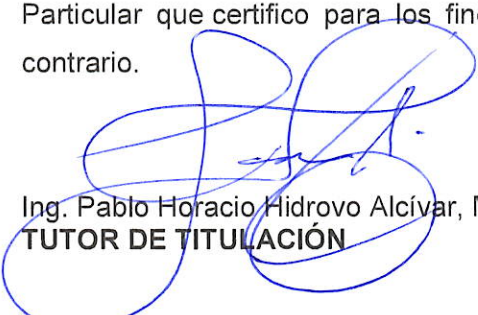
## Certificación del Tutor

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante **Pérez Macías Ider Isrrael**, legalmente matriculado en la carrera de Ingeniería Industrial, período académico **2026-1**, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es **“VIABILIDAD DE LA SUSTITUCIÓN DE BÚNKER POR GLP EN CALDEROS INDUSTRIALES: ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA Y AMBIENTAL EN UNA EMPRESAS DE MANTA”**.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad de este, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.



Ing. Pablo Horacio Hidrovo Alcívar, Mg.  
**TUTOR DE TITULACIÓN**

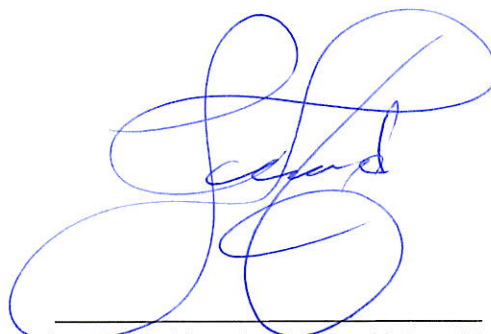
## Declaración de Autoría de Tesis

Pérez Macías Ider Isrrael, estudiante de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura, Carrera de Ingeniería Industrial, libre y voluntariamente declaro que la responsabilidad del contenido del presente trabajo titulado **“VIABILIDAD DE LA SUSTITUCIÓN DE BÚNKER POR GLP EN CALDEROS INDUSTRIALES: ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA Y AMBIENTAL EN UNA EMPRESAS DE MANTA”** es una elaboración personal realizada únicamente con la dirección del tutor, Ing. Pablo Horacio Hidrovo Alcívar y la propiedad intelectual de la misma pertenece a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.



Pérez Macías Ider Isrrael

C.I. 1315335560



Ing. Pablo Horacio Hidrovo Alcívar, Mg.

C.I. 0802289850

Manta, 11 de agosto de 2026

## **Dedicatoria**

A mi abuelo, que se fue antes de poder ver este documento impreso. De él aprendí lo que significa el trabajo duro de verdad y la rectitud. Sé que hoy estaría celebrando este logro conmigo. A mi abuelita, por ser el pilar de la familia y por todo ese cariño que nunca me ha faltado.

A mis padres. Todo este esfuerzo es el resultado directo de lo que ustedes sembraron en mí. Gracias por trabajar sin descanso para darme la oportunidad de estudiar y por empujarme a seguir incluso en esos semestres donde yo mismo dudaba si iba a poder terminar la carrera. Esto es de ustedes.

A mis hermanos, por aguantar mis malos ratos y estar siempre cerca. Y a mi sobrino, porque llegar a casa y ver su energía me quitaba el cansancio de golpe.

A mi novia. Empezamos esta etapa universitaria juntos desde primer semestre, y desde el quinto hemos caminado literalmente de la mano. Gracias por compartir no solo la misma carrera de ingeniería, sino las madrugadas resolviendo cálculos, el estrés de los proyectos y por ser mi mayor apoyo hasta llegar juntos a este octavo y último semestre. Lo logramos.

A mis amigos y compañeros de facultad, con quienes compartí desde las aulas hasta las amanecidas haciendo informes. Esta etapa no habría sido lo mismo sin ustedes; me llevo grandes experiencias.

## **Reconocimiento**

A la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM) y a la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura. Gracias por brindarme el espacio, los docentes y las herramientas necesarias para mi formación profesional.

Al Ing. Pablo Horacio Hidrovo Alcívar, mi tutor de titulación. Le agradezco sinceramente por la paciencia durante las revisiones de este trabajo, por exigirme siempre más y por compartir su experiencia técnica, lo cual fue clave para aterrizar esta investigación con rigor.

A mis padres, por enseñarme con el ejemplo que las cosas se ganan trabajando con honestidad. A mi abuelo, a quien dedico de manera muy personal este logro, pues aunque su partida nos dejó un gran vacío familiar, me dejó también la mejor herencia: la disciplina y la forma correcta de hacer las cosas.

A mis hermanos y a mi sobrino, por ser esa motivación diaria que uno necesita para no rendirse frente a los obstáculos y el cansancio.

# Índice de Contenido

|                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Certificación del Tutor .....</b>                                      | <b>iii</b> |
| <b>Declaración de Autoría de Tesis .....</b>                              | <b>iv</b>  |
| Dedicatoria .....                                                         | v          |
| Reconocimiento.....                                                       | vi         |
| Índice de Contenido.....                                                  | vii        |
| Índice de Tablas .....                                                    | xiii       |
| Resumen Ejecutivo.....                                                    | xv         |
| Executive Summary.....                                                    | xvii       |
| Introducción.....                                                         | 1          |
| Planteamiento del problema .....                                          | 4          |
| Formulación del problema .....                                            | 6          |
| Preguntas directrices .....                                               | 7          |
| Objetivos .....                                                           | 9          |
| Objetivo General.....                                                     | 9          |
| Objetivos Específicos .....                                               | 9          |
| Justificación.....                                                        | 10         |
| Capítulo 1.....                                                           | 12         |
| 1    Fundamentación Teórica .....                                         | 12         |
| 1.1    Antecedentes Investigativos.....                                   | 12         |
| 1.2    Bases Teóricas .....                                               | 15         |
| 1.2.1    Fundamentos Teóricos .....                                       | 15         |
| 1.2.1.1    Transición Energética Global y Sostenibilidad Industrial ..... | 15         |

|         |                                                                                   |    |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.2.1.2 | Alineación Estratégica con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)           | 16 |
| 1.2.1.3 | Fundamentos Termodinámicos, Balance de Masa y Energía bajo Código ASME PTC 4..... | 17 |
| 1.2.1.4 | Combustibles Fósiles y su Impacto Ambiental.....                                  | 22 |
| 1.2.2   | Sustitución del Búnker por Gas Licuado de Petróleo (GLP) .....                    | 25 |
| 1.2.2.1 | Caracterización Técnica y Energética del GLP.....                                 | 25 |
| 1.2.2.2 | Evaluaciones Comparativas de Combustibles en la Industria.....                    | 27 |
| 1.2.2.3 | Marco Normativo y Regulatorio Ambiental .....                                     | 30 |
| 1.2.2.4 | Política energética y climática .....                                             | 31 |
| 1.2.2.5 | Regulación de emisiones atmosféricas .....                                        | 31 |
| 1.2.2.6 | Normas técnicas para instalaciones y almacenamiento de GLP ....                   | 32 |
| 1.2.2.7 | Requisitos locales y autorización del proyecto .....                              | 33 |
| 1.2.3   | Aplicación en el Contexto Ecuatoriano y Local (Manta).....                        | 33 |
| 1.2.3.1 | Estructura Energética del Ecuador .....                                           | 34 |
| 1.2.4   | Transición energética en Ecuador.....                                             | 37 |
| 1.2.5   | Ecuaciones para la normalización económica de la energía útil.....                | 39 |
| 1.2.5.1 | Costo de energía térmica de entrada (Fuel Oil No. 6): .....                       | 39 |
| 1.2.5.2 | Costo de energía térmica de entrada (GLP): .....                                  | 39 |
| 1.2.5.3 | Costo de la energía útil transferida al vapor .....                               | 39 |
| 1.2.5.4 | Conclusión del diagnóstico sectorial.....                                         | 40 |
| 1.2.5.5 | Problemática Energética en una Empresa Manufacturera del Cantón Manta             | 40 |
| 1.2.6   | Bases Conceptuales del Estudio de Viabilidad.....                                 | 42 |

|         |                                                                |    |
|---------|----------------------------------------------------------------|----|
| 1.2.6.1 | Viabilidad técnica .....                                       | 42 |
| 1.2.6.2 | Viabilidad económica .....                                     | 43 |
| 1.2.6.3 | Viabilidad ambiental .....                                     | 44 |
| 1.2.6.4 | Integración de las dimensiones .....                           | 44 |
| 1.3     | Marco Conceptual .....                                         | 46 |
| 1.3.1   | Sistemas de Generación de Vapor y Transferencia de Calor ..... | 47 |
| 1.3.2   | Dinámica de los Combustibles y la Combustión .....             | 49 |
| 1.3.3   | Parámetros Ambientales y de Sostenibilidad .....               | 51 |
| 1.3.4   | Evaluación de Proyectos de Ingeniería .....                    | 52 |
| 1.4     | Marco Legal y Ambiental.....                                   | 53 |
| 1.5     | Hipótesis y Variables.....                                     | 55 |
| 1.5.1   | Hipótesis .....                                                | 56 |
| 1.5.2   | Identificación de las Variables .....                          | 57 |
| 1.5.3   | Operacionalización de las Variables .....                      | 58 |
| 1.5.3.1 | Operacionalización de la Variable Independiente .....          | 58 |
| 1.5.3.2 | Operacionalización de la Variable Dependiente .....            | 60 |
| 1.6     | Marco Metodológico .....                                       | 65 |
| 1.6.1   | Modalidad Básica de la Investigación .....                     | 66 |
| 1.6.1.1 | Investigación Bibliográfica–Documental .....                   | 66 |
| 1.6.1.2 | Investigación de Campo .....                                   | 67 |
| 1.6.1.3 | Diseño No Experimental .....                                   | 68 |
| 1.6.2   | Enfoque .....                                                  | 68 |
| 1.6.3   | Nivel de Investigación .....                                   | 69 |

|                 |                                                                 |     |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 1.6.3.1         | Nivel Descriptivo .....                                         | 69  |
| 1.6.3.2         | Nivel Explicativo .....                                         | 70  |
| 1.6.4           | Población de Estudio .....                                      | 70  |
| 1.6.5           | Tamaño de la Muestra .....                                      | 71  |
| 1.6.6           | Técnicas de recolección de datos .....                          | 71  |
| 1.6.7           | Plan de recolección de datos .....                              | 73  |
| 1.6.8           | Procesamiento de la Información .....                           | 75  |
| 1.6.8.1         | Sistematización y Depuración de Datos .....                     | 76  |
| 1.6.8.2         | Modelado Termodinámico y Cálculo de Eficiencia.....             | 77  |
| 1.6.8.3         | Evaluación Ambiental y Cumplimiento Legal .....                 | 79  |
| 1.6.8.4         | Análisis Económico-Financiero.....                              | 80  |
| Capítulo 2..... |                                                                 | 82  |
| 2               | Diagnóstico o Estudio de Campo .....                            | 82  |
| 2.1             | Análisis situacional.....                                       | 82  |
| 2.1.1           | Evaluación Técnica de la Línea Base (Búnker C).....             | 82  |
| 2.1.1.1         | Caracterización general de los equipos.....                     | 83  |
| 2.2             | Diagnóstico Termodinámico y Ambiental. ....                     | 88  |
| 2.2.1           | Diagnóstico Ambiental Paramétrico .....                         | 91  |
| 2.2.2           | Cierre del apartado diagnóstico.....                            | 94  |
| 2.3             | Diagnóstico Operativo y Estructura de Costos (OPEX actual)..... | 95  |
| 2.3.1           | Estructuración del costo operativo cuantificable .....          | 98  |
| 2.3.2           | Tratamiento contable del consumo eléctrico .....                | 99  |
| Capítulo 3..... |                                                                 | 100 |

|         |                                                                              |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3       | Propuesta de Mejora .....                                                    | 100 |
| 3.1     | Ingeniería Preliminar y Balance Térmico Estequiométrico.....                 | 100 |
| 3.1.1   | Energía de Entrada con Búnker C (Baseline).....                              | 101 |
| 3.1.2   | Demanda de Energía Útil de Referencia .....                                  | 101 |
| 3.1.3   | Demanda de Energía Proyectada con GLP .....                                  | 102 |
| 3.1.4   | Tasa Másica y Flujo Promedio de GLP .....                                    | 102 |
| 3.1.5   | Requerimiento Diario de Consumo (GLP) .....                                  | 103 |
| 3.1.6   | Proyección Operativa Anualizada .....                                        | 103 |
| 3.1.7   | Cálculo del Flujo Máximo para Dimensionamiento Pre-FEED.....                 | 103 |
| 3.1.8   | Conclusiones de la Ingeniería de Detalle y Modelación Estequiométrica<br>105 |     |
| 3.2     | Diseño del Sistema de Almacenamiento y Tren de Regulación.....               | 106 |
| 3.2.1   | Dimensionamiento del Parque de Almacenamiento .....                          | 106 |
| 3.2.1.1 | Selección preliminar .....                                                   | 107 |
| 3.2.1.2 | Alternativas de configuración espacial.....                                  | 107 |
| 3.2.1.3 | Autonomía de seguridad .....                                                 | 108 |
| 3.2.2   | Criterios de Implantación Física e Ingeniería Segura .....                   | 108 |
| 3.2.2.1 | Sistema de Vaporización Forzada.....                                         | 108 |
| 3.2.2.2 | Consumo eléctrico del vaporizador .....                                      | 109 |
| 3.2.2.3 | Tren de regulación y dimensionamiento de línea .....                         | 109 |
| 3.2.2.4 | Emplazamiento, presiones y seguridad contra incendios .....                  | 110 |
| 3.3     | Proyección de Mitigación Ambiental.....                                      | 112 |
| 3.3.1   | Cuantificación de Emisiones: Línea Base con Búnker C .....                   | 112 |

|         |                                                                         |     |
|---------|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.2   | Cuantificación de Emisiones: Escenario Proyectado con GLP .....         | 113 |
| 3.3.3   | Reducción de la Huella de Carbono y Variación Porcentual.....           | 113 |
| 3.3.4   | Comportamiento Proyectado de Otros Contaminantes Atmosféricos .         | 115 |
| 3.3.4.1 | Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ): .....                             | 115 |
| 3.3.4.2 | Material particulado (PM) y Opacidad:.....                              | 115 |
| 3.3.4.3 | Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) y Monóxido de carbono (CO):..... | 115 |
| 3.3.4.4 | Comparación Normativa y Cierre del Apartado Ambiental.....              | 116 |
| 3.4     | Evaluación Financiera y Costo de Ciclo de Vida (LCC).....               | 116 |
| 3.4.1   | Estructura de Capital (CAPEX) .....                                     | 117 |
| 3.4.2   | Optimización Operativa (OPEX) e Indicadores de Rentabilidad .....       | 117 |
| 3.4.2.1 | Costo anual del escenario proyectado (GLP) .....                        | 118 |
| 3.4.2.2 | Flujo de caja incremental (FNE) .....                                   | 118 |
| 3.4.2.3 | Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR).....            | 118 |
| 3.4.2.4 | Análisis de Sensibilidad de Punto de Equilibrio .....                   | 119 |
| 3.4.2.5 | Conclusión Financiera .....                                             | 119 |
| 3.5     | Discusión de Resultados.....                                            | 120 |
| 3.6     | Matriz de Decisión Multicriterio (Evaluación Integral) .....            | 122 |
| 3.6.1   | Cálculo de los puntajes ponderados .....                                | 125 |
| 3.6.1.1 | Interpretación de la evaluación multicriterio.....                      | 125 |
| 3.6.2   | Análisis de robustez y sensibilidad .....                               | 125 |
|         | Conclusiones.....                                                       | 127 |
|         | Recomendaciones.....                                                    | 130 |
|         | Bibliografía .....                                                      | 134 |

## Índice de Tablas

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1. <i>Tabla comparativa entre Bunker C y GLP</i> .....                                                    | 29  |
| Tabla 2. <i>Variables del contexto energético ecuatoriano relevantes para la evaluación</i><br>.....            | 35  |
| Tabla 3. <i>Precios oficiales seleccionados de Fuel Oil No. 6 y GLP industrial (Referencia temporal)</i> .....  | 38  |
| Tabla 4. <i>Criterios multicriterio utilizados para la evaluación integral de viabilidad del proyecto</i> ..... | 45  |
| Tabla 5. <i>Matriz de Operacionalización: Variable Independiente</i> .....                                      | 58  |
| Tabla 6. <i>Matriz de Operacionalización: Variable Dependiente</i> .....                                        | 60  |
| Tabla 7. <i>Matriz de Correspondencia Hipotética y Decisión</i> .....                                           | 64  |
| Tabla 8. <i>Plan de recolección y clasificación de datos</i> .....                                              | 74  |
| Tabla 9. <i>Caracterización técnica del sistema de generación de vapor referencial</i> ...                      | 84  |
| Tabla 10. <i>Parámetros termo-operativos adoptados para la línea base con Búnker C</i><br>.....                 | 88  |
| Tabla 11. <i>Matriz de variables ambientales consideradas para la línea base con Búnker C</i> .....             | 91  |
| Tabla 12. <i>Línea base operativa y estructura de costos asociados al uso de Búnker C</i><br>.....              | 96  |
| Tabla 13. <i>Consolidación del Balance de Energía y Materia Corregido</i> .....                                 | 104 |
| Tabla 14. <i>Dimensionamiento preliminar de ingeniería para el sistema GLP</i> .....                            | 110 |
| Tabla 15. <i>Comparación de emisiones directas de CO<sub>2</sub> entre los escenarios</i> .....                 | 114 |
| Tabla 16. <i>Estructura de inversión referencial del sistema de reconversión</i> .....                          | 117 |
| Tabla 17. <i>Flujo de caja incremental proyectado (escenario base)</i> .....                                    | 118 |
| Tabla 18. <i>Sensibilidad de la viabilidad económica</i> .....                                                  | 119 |

Tabla 19. *Matriz de evaluación multicriterio ponderada: Búnker C frente a GLP ...* 123

## Resumen Ejecutivo

Esta investigación analiza la viabilidad de sustituir Búnker C por Gas Licuado de Petróleo (GLP) en calderas pirotubulares utilizadas para procesar conservas de atún en el cantón Manta. El estudio tuvo un enfoque cuantitativo, diseño no experimental y se desarrolló como un caso técnico referencial. Debido a las restricciones de confidencialidad del sector privado, se trabajó con información operativa agregada, datos documentales y supuestos de ingeniería, sin identificar a una empresa específica. Por esta razón, los resultados corresponden a una evaluación preliminar y no a una auditoría energética certificada. El procedimiento incluyó balances de masa y energía, criterios del método indirecto de ASME PTC 4, estimación de emisiones directas y un análisis financiero incremental para un periodo de diez años.

Para establecer la línea base se tomó como referencia una unidad térmica equivalente de 400 BHP, operada durante dos turnos diarios de ocho horas. El consumo considerado fue de 540 galones de Búnker C por día, con una eficiencia térmica del 74,5 %. Estos datos permitieron estimar una producción promedio de 3.498 lb/h de vapor, que representa el 25,35 % de la capacidad nominal del equipo. En la proyección con GLP se empleó una eficiencia del 86,5 %. El consumo calculado fue de 93,07 kg/h, equivalente a 1.489,12 kg diarios o cerca de 728,48 galones de GLP líquido. También se obtuvo un flujo máximo de diseño de 809,11 lb/h. Para mantener una autonomía de quince días se necesitaría un almacenamiento mínimo de 12.855,53 galones, por lo que la capacidad comercial seleccionada deberá ser igual o superior a 12.900 galones.

Los cálculos ambientales muestran que la línea base produciría 1.898,37 t CO<sub>2</sub>/año, mientras que el escenario con GLP alcanzaría 1.333,40 t CO<sub>2</sub>/año. La sustitución representaría una disminución estimada de 564,97 t CO<sub>2</sub>/año, correspondiente al 29,76 %. El GLP también presenta menor potencial de generar hollín, material particulado y emisiones relacionadas con el contenido de azufre. No obstante, estos resultados son proyecciones. Las concentraciones reales de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, material particulado y opacidad deberán

comprobarse mediante mediciones realizadas después de una posible reconversión, siguiendo los métodos establecidos en la normativa ambiental aplicable.

En el análisis económico se consideró una inversión inicial de referencia de USD 145.000. El costo anual cuantificable de la operación con Búnker C fue de USD 320.470,17, frente a USD 385.311,59 para el escenario con GLP. Esto generó una diferencia desfavorable de USD 64.841,42 al año. Al proyectar los resultados durante diez años y aplicar una tasa de descuento del 12 %, se obtuvo un Valor Actual Neto de USD -511.368,47. Los flujos calculados tampoco produjeron una Tasa Interna de Retorno positiva ni permitieron recuperar la inversión dentro del periodo analizado.

Con estos resultados, la sustitución puede considerarse técnicamente factible en una etapa preliminar y ambientalmente favorable según las estimaciones realizadas. Sin embargo, no es económicamente viable bajo los precios utilizados en el escenario base. La propuesta podría evaluarse nuevamente si disminuye el precio industrial del GLP, aumenta el costo relativo del Búnker C, se reduce la inversión inicial o se comprueban otros ahorros operativos que no pudieron cuantificarse en este estudio.

**Palabras clave:** eficiencia energética calderas pirotubulares Gas Licuado de Petróleo Búnker C reconversión tecnológica emisiones de dióxido de carbono evaluación financiera.

## Executive Summary

This research examines the feasibility of replacing Bunker C with Liquefied Petroleum Gas (LPG) in fire-tube boilers used in tuna canning operations in Manta. A quantitative, non-experimental approach was applied through a technical reference case study. Since private companies in this sector have confidentiality restrictions, the analysis relied on aggregated operating information, documentary data, and engineering assumptions without identifying a specific company. Therefore, the findings represent a preliminary assessment rather than a certified energy audit. The procedure included mass and energy balances, criteria from the indirect method established in ASME PTC 4, direct emission estimates, and a ten-year incremental financial analysis.

The baseline scenario was defined using an equivalent 400 BHP thermal unit operating in two eight-hour shifts per day. Bunker C consumption was set at 540 gallons per day, with a reference thermal efficiency of 74.5%. These values resulted in an estimated average steam output of 3,498 lb/h, corresponding to 25.35% of the boiler's rated capacity. For the LPG scenario, a projected thermal efficiency of 86.5% was used. The calculated consumption was 93.07 kg/h, equivalent to 1,489.12 kg per day or approximately 728.48 gallons of liquid LPG. The maximum design flow was 809.11 lb/h. To provide fifteen days of operating autonomy, a minimum storage volume of 12,855.53 gallons would be required. Therefore, the selected commercial capacity should be at least 12,900 gallons.

The environmental calculations show that the baseline scenario would produce 1,898.37 t CO<sub>2</sub>/year, while the LPG scenario would generate 1,333.40 t CO<sub>2</sub>/year. The proposed replacement would reduce emissions by an estimated 564.97 t CO<sub>2</sub>/year, equivalent to 29.76%. LPG would also have a lower potential to produce soot, particulate matter, and emissions related to the sulfur content of the fuel. However, these results are projections. Actual concentrations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, particulate matter, and opacity would need to be verified after a possible conversion using the methods established in the applicable environmental regulations.

The financial analysis considered a reference initial investment of USD 145,000. The quantifiable annual operating cost of the Bunker C scenario was USD 320,470.17, compared with USD 385,311.59 for LPG. This represents an unfavorable annual difference of USD 64,841.42. Over a ten-year period and at a discount rate of 12%, the project produced a Net Present Value of USD -511,368.47. The projected cash flows did not produce a positive Internal Rate of Return, and the initial investment was not recovered within the evaluation period.

Based on these results, the conversion can be considered technically feasible at a preliminary stage and environmentally favorable according to the estimates. Nevertheless, it is not financially viable under the prices used in the baseline scenario. The proposal could be reassessed if the industrial price of LPG decreases, the relative cost of Bunker C increases, the initial investment is reduced, or additional operating savings not quantified in this study are confirmed.

**Keywords:** energy efficiency fire-tube boilers Liquefied Petroleum Gas Bunker C technological conversion carbon dioxide emissions financial analysis.

## Introducción

En la industria de conservas de atún, la producción de vapor es un servicio auxiliar esencial porque se utiliza directamente en procesos de transferencia térmica, como el calentamiento, la cocción y la esterilización del producto. El desempeño termodinámico de este sistema incide sustancialmente sobre el consumo de combustible, los costos operativos, la disponibilidad de los equipos y las emisiones liberadas por las fuentes fijas de combustión, en consecuencia, la eficiencia energética de los calderos representa un componente crítico dentro de la gestión industrial y ambiental de las plantas procesadoras.

En los sistemas térmicos operados con combustibles residuales como el Búnker C, el régimen continuo exige etapas previas de almacenamiento térmico, precalentamiento, bombeo y atomización, asimismo, las propiedades fisicoquímicas de este hidrocarburo propician la formación de hollín y la acumulación de incrustaciones sobre las superficies de intercambio de calor, particularmente cuando los parámetros de combustión y las rutinas de mantenimiento resultan deficientes. Estos fenómenos físicos incrementan las pérdidas de calor, elevan la frecuencia de las paradas por limpieza y penalizan el rendimiento térmico global, frente a ello, la evaluación de energéticos alternativos responde tanto a requerimientos de optimización operativa como al cumplimiento de la Ley Orgánica de Eficiencia Energética, normativa que promueve el uso racional de la energía en el sector productivo nacional.

Dentro de las opciones disponibles, el Gas Licuado de Petróleo (GLP) presenta propiedades favorables para la mezcla estequiométrica con el aire de combustión y registra un contenido de azufre significativamente menor frente a los residuales pesados, sin embargo, su adopción no constituye una solución técnica y financiera de aplicación universal. La transición demanda un análisis riguroso que valide la compatibilidad de los quemadores, el requerimiento másico de vapor, las dimensiones del almacenamiento, la capacidad del sistema de vaporización, los protocolos de seguridad industrial, el diferencial de precios entre combustibles y la inversión de capital para la reconversión, adicionalmente, si bien el GLP mitiga fracciones contaminantes específicas, mantiene su naturaleza fósil, catalogándose

estrictamente como un vector de transición hacia matrices energéticas menos intensivas en carbono.

Bajo esta premisa, el presente trabajo evalúa la viabilidad técnica, económica y ambiental de la sustitución de Búnker C por GLP en calderas pirotubulares empleadas en el procesamiento de conservas de atún en el cantón Manta, la investigación se estructura bajo un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental. Ante las políticas de confidencialidad del sector industrial, el desarrollo metodológico adopta la forma de un estudio de caso referencial, alimentado por datos operativos agregados, parámetros estándar de ingeniería y manuales técnicos de equipos equivalentes, esta delimitación asegura la protección de la identidad corporativa y, simultáneamente, se estima la trazabilidad técnica de las variables formuladas.

El modelo de diagnóstico se fundamenta en un sistema compuesto por calderos pirotubulares con una capacidad térmica equivalente a 400 BHP, cuya línea base integra el consumo de Búnker C, la eficiencia térmica de referencia, el perfil de operación general y las horas-equipos destinadas a la remoción mecánica de hollín, de modo que, para la proyección con GLP, se estructura un balance de materia y energía aplicando los fundamentos del método indirecto establecido en la norma ASME PTC 4. Este cálculo termodinámico se complementa con el dimensionamiento volumétrico preliminar de la estación de almacenamiento y vaporización, la estimación de emisiones atmosféricas y una evaluación financiera de flujos incrementales, por la naturaleza del estudio, los indicadores del escenario propuesto constituyen simulaciones de ingeniería previas a la ejecución física del proyecto.

El documento se estructura en tres capítulos, conforme a los lineamientos institucionales de titulación, en el Capítulo 1 se abarca la fundamentación teórica, legal y metodológica que rige la generación industrial de vapor, la termoquímica de la combustión, los criterios de eficiencia energética y las técnicas de evaluación financiera, el Capítulo 2 caracteriza el diagnóstico del escenario base con Búnker C, detallando los parámetros termo-operativos, el inventario de emisiones y la estructura de costos actuales, finalmente, el Capítulo 3 despliega la propuesta de sustitución por GLP, integrando el balance energético

corregido, la estimación de requerimientos de infraestructura y el análisis de sus impactos técnicos, ambientales y económicos.

La comparación de ambos escenarios permitirá identificar las condiciones operativas y económicas que influyen en una posible reconversión. Debido al carácter referencial del estudio, los resultados no pueden generalizarse a todas las empresas atuneras de Manta ni permiten afirmar que el uso de GLP será rentable bajo cualquier precio de mercado. El modelo desarrollado servirá como apoyo para evaluar futuras decisiones de inversión, al mostrar los beneficios técnicos esperados y las principales limitaciones relacionadas con el cambio de combustible.

## **Planteamiento del problema**

En la industria alimentaria, el vapor se utiliza en diferentes operaciones de calentamiento, cocción y esterilización. Su suministro debe mantenerse estable para evitar interrupciones en la producción y un consumo innecesario de energía. En las plantas procesadoras de atún, el desempeño de las calderas influye tanto en la disponibilidad de los equipos como en los costos del proceso. Por esta razón, la elección del combustible debe analizarse desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

A nivel nacional, una fracción considerable de los sistemas térmicos industriales opera con derivados pesados del petróleo, como el Fuel Oil No. 6, comercialmente conocido como Búnker C, el cual es un hidrocarburo que presenta una elevada viscosidad y, por lo tanto, exige etapas de pre-acondicionamiento térmico, bombeo y atomización previas a su combustión. Bajo condiciones operativas subóptimas, sus propiedades fisicoquímicas propician la formación de hollín y la acumulación de incrustaciones en el haz tubular, estos depósitos incrementan la resistencia térmica, reduciendo la transferencia de calor y elevando la frecuencia de las paradas por limpieza, situaciones que justifican el análisis técnico de energéticos alternativos.

La presente investigación toma como referencia una planta procesadora del sector atunero ubicada en el cantón Manta, cuya identidad se mantiene bajo reserva en acatamiento a las políticas de confidencialidad corporativa, dentro de un escenario de estudio que contempla una batería de cinco calderos pirotubulares operando bajo un régimen de dos turnos diarios de ocho horas. Bajo este contexto, el perfil de demanda térmica real de la planta se caracteriza por requerir una producción efectiva promedio de 3.498 lb/h de vapor, lo que equivale a un factor de carga del 25,35 % respecto a la capacidad nominal instalada de 400 BHP. Precisar con rigor esta condición operativa demuestra que el análisis de la transición energética no se limita a la capacidad máxima de placa de los equipos, sino que se adapta estrictamente al régimen de modulación diario exigido por los procesos de esterilización y cocción.

La combustión de Búnker C acarrea actividades operativas conexas, referidas tanto a su acondicionamiento fluido como a la remoción mecánica de los residuos carbonosos, registrándose en el escenario base unas 80 horas-equipos mensuales destinadas al mantenimiento preventivo y limpieza del parque de calderos, lo cual refleja el tiempo acumulado de intervención sobre los equipos térmicos que, no obstante y debido a la falta de datos específicos sobre la programación del mantenimiento, la redundancia del sistema o la holgura productiva, no se cataloga como una pérdida directa de horas de producción.

Desde la dimensión ambiental, la quema de combustibles residuales libera emisiones significativas de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), material particulado (PM), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), siendo la concentración de estos contaminantes una variable que está en función de la composición elemental del crudo, la estequiometría de la combustión, el porcentaje de exceso de aire, la carga térmica y el rigor del mantenimiento industrial. Dada la naturaleza referencial del estudio, la contrastación de estas emisiones con los límites máximos permisibles para fuentes fijas constituye únicamente un diagnóstico preliminar, la certificación de cumplimiento ambiental exige mediciones *in situ* ejecutadas bajo los métodos estandarizados por la autoridad competente.

Frente a esta problemática, el Gas Licuado de Petróleo (GLP) emerge como una alternativa viable para la reconversión de los sistemas térmicos, ya que, al ingresar a la cámara en fase gaseosa, facilita una mezcla homogénea con el aire comburente, mitigando la generación de inquemados sólidos y suprimiendo las emisiones derivadas del azufre. Sin embargo, la factibilidad de esta transición demanda la evaluación técnica del dimensionamiento para almacenamiento, los sistemas de vaporización y regulación, los protocolos de seguridad industrial, la compatibilidad de los quemadores y la logística de abastecimiento, además, es imperativo reconocer que, si bien el GLP reduce el factor de emisión de gases de efecto invernadero, mantiene su clasificación como hidrocarburo fósil, actuando como un puente de transición energética y no como una solución de descarbonización total.

Desde el punto de vista económico, la conversión a GLP requiere una inversión inicial para adquirir e instalar los tanques de almacenamiento, el sistema de regulación y medición, el vaporizador, los dispositivos de seguridad y las adaptaciones necesarias en los quemadores. Además, la empresa deberá asumir el precio del gas, el consumo eléctrico de los equipos auxiliares, el mantenimiento y las inspecciones correspondientes. Por ello, una mejora en la eficiencia térmica o una reducción de emisiones no significa necesariamente que el proyecto también será rentable.

El problema se concentra en la falta de un análisis que permita comparar el funcionamiento del Búnker C y el GLP bajo las mismas condiciones de operación. Sin esta evaluación no es posible establecer si el aumento esperado de la eficiencia y la disminución de las emisiones compensarían la inversión inicial y el mayor costo del combustible durante el periodo analizado. Para responder esta interrogante, la investigación desarrolla balances de masa y energía, estima la infraestructura necesaria para el suministro de GLP, calcula las emisiones de ambos escenarios y compara sus resultados económicos mediante flujos de caja incrementales.

## **Formulación del problema**

A partir de la situación analizada se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Es viable, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, sustituir Búnker C por Gas Licuado de Petróleo (GLP) en las calderas pirotubulares de una planta procesadora de atún del cantón Manta, considerando los resultados de los balances de masa y energía y del análisis de los flujos de caja incrementales?

### **Alcance de la formulación**

La pregunta se responde mediante un caso técnico referencial. Para proteger la confidencialidad de la empresa, se omiten su identidad y los datos que podrían permitir su reconocimiento. El análisis utiliza información operativa presentada de manera agregada y parámetros de ingeniería aplicables a calderas pirotubulares con características similares.

Los resultados permiten conocer el comportamiento esperado de la sustitución de combustible bajo las condiciones establecidas en el estudio. No corresponden a una auditoría energética certificada ni demuestran que la reconversión haya sido ejecutada físicamente en una empresa determinada.

### **Preguntas directrices**

1. ¿Cuál es la caracterización termo-operativa de la línea base operando con Búnker C y cuál es el perfil estimado de sus emisiones atmosféricas en el parque de calderos en estudio?
2. ¿Qué variaciones termodinámicas se proyectan sobre la eficiencia y las condiciones de combustión al simular la sustitución por GLP aplicando el método indirecto de balance térmico?
3. ¿Qué requerimientos de ingeniería y dimensionamiento volumétrico debe satisfacer la infraestructura de almacenamiento, vaporización, regulación y suministro de gas, conforme a la normativa de seguridad industrial vigente?
4. ¿Cuál es la factibilidad financiera de la reconversión tecnológica, determinada a través del Costo de Ciclo de Vida y los indicadores de Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno y Periodo de Recuperación de la Inversión?

### **Criterios para responder la pregunta de investigación**

La viabilidad técnica se determinará comprobando si el sistema propuesto puede cubrir la demanda de energía y vapor de la línea base. También se revisará que los equipos de almacenamiento, vaporización, regulación y seguridad tengan capacidad suficiente para las condiciones calculadas.

En la dimensión ambiental se compararán las emisiones estimadas para ambos combustibles. Los resultados se contrastarán de manera preliminar con los límites aplicables a las fuentes fijas de combustión. Esta comparación no reemplaza las mediciones que deberán realizarse en una instalación real para comprobar el cumplimiento de la normativa.

La viabilidad económica dependerá de los resultados obtenidos en el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno y el Periodo de Recuperación. La sustitución será favorable en esta dimensión si el VAN es positivo, la TIR supera la tasa de descuento y la inversión se recupera dentro de los diez años analizados. Finalmente, los tres componentes se valorarán en conjunto, aunque sus resultados no sean favorables al mismo tiempo. Esto permitirá identificar tanto los beneficios como las limitaciones de la propuesta.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de sustituir Búnker C por Gas Licuado de Petróleo (GLP) en las calderas pirotubulares de una planta procesadora de atún del cantón Manta, mediante un caso técnico referencial que permita conocer los cambios esperados en el rendimiento termodinámico y su posible aporte al cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

### **Objetivos Específicos**

1. Diagnosticar el estado termo-operativo de la línea base con Búnker C y estimar el perfil referencial de emisiones atmosféricas en el parque de calderos en estudio.
2. Modelar el desempeño térmico proyectado y las condiciones estequiométricas de combustión al operar con GLP, aplicando los criterios del método indirecto establecidos en la norma ASME PTC 4.
3. Dimensionar los requerimientos de ingeniería para la infraestructura de almacenamiento, vaporización, regulación y suministro de gas, conforme a los estándares y normativas de seguridad industrial aplicables a la transición energética.
4. Determinar la factibilidad financiera de la reconversión tecnológica mediante la estructuración de flujos de caja y el cálculo del Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno y el Periodo de Recuperación de la Inversión, incorporando explícitamente un análisis de sensibilidad para evaluar cómo la viabilidad económica dependerá críticamente de las variaciones del precio del GLP y del Búnker C.

## Justificación

La investigación responde a la necesidad de contar con información técnica antes de sustituir el combustible utilizado en un sistema industrial de generación de vapor. En las plantas procesadoras de atún, el suministro térmico es necesario para operaciones como la cocción y la esterilización. Una falla o un bajo rendimiento de las calderas puede ocasionar interrupciones, mayor consumo de energía y aumento de los costos de producción. Por ello, se compara la operación con Búnker C frente a un escenario proyectado con GLP, con el fin de conocer las ventajas y limitaciones de cada alternativa.

En el campo académico, el estudio aplica conocimientos de termodinámica, combustión, transferencia de calor, eficiencia energética y evaluación de proyectos. Su aporte no consiste en formular una teoría nueva, sino en utilizar estos principios para analizar un problema presente en la industria. Los balances de masa y energía permiten comparar el rendimiento de ambos combustibles bajo una misma demanda de vapor. A esta evaluación se incorporan los costos de operación, las emisiones y las necesidades de infraestructura.

La metodología se justifica porque organiza información de diferentes procedencias dentro de un caso técnico referencial. Los datos disponibles de la empresa se presentan de manera agregada debido a las restricciones de confidencialidad, mientras que los valores faltantes se completan con parámetros documentales aplicables a calderas de características similares. Para mantener la trazabilidad, cada valor se clasifica como dato operativo, parámetro técnico, supuesto de modelación o resultado calculado. Los balances térmicos se desarrollan con criterios del método indirecto de ASME PTC 4 y el prediseño de la infraestructura considera las disposiciones relacionadas con el manejo seguro del GLP. En consecuencia, los resultados corresponden a una simulación de ingeniería y no a una auditoría energética certificada.

La evaluación económica permite establecer si los beneficios técnicos y ambientales esperados compensarían la inversión y los gastos del nuevo sistema. Una disminución del consumo de combustible no asegura por sí sola un ahorro económico, porque el Búnker C y

el GLP tienen precios, poderes caloríficos y unidades de comercialización diferentes. Por esta razón, se construyen flujos de caja incrementales y se calculan el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno y el Periodo de Recuperación. Estos indicadores muestran si la reconversión sería rentable bajo las condiciones utilizadas y ayudan a identificar los precios a partir de los cuales podría reconsiderarse el proyecto.

En el componente ambiental se estiman las emisiones de dióxido de carbono para los dos escenarios. También se analizan los cambios esperados en los contaminantes relacionados con el contenido de azufre, el hollín y el material particulado. La comparación con el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente sirve como referencia para conocer los requisitos que deberá atender una instalación industrial. Sin embargo, las estimaciones no reemplazan los monitoreos en la fuente ni permiten confirmar por sí solas el cumplimiento de los límites establecidos.

La seguridad industrial también forma parte del análisis. El uso de GLP puede disminuir algunos problemas asociados con la combustión del Búnker C, pero incorpora peligros relacionados con el almacenamiento y la conducción de un gas inflamable a presión. Por ello, la propuesta considera distancias de seguridad, equipos de regulación, válvulas de alivio y sistemas de protección. La conveniencia del cambio dependerá de que estos nuevos riesgos puedan controlarse adecuadamente.

Finalmente, el estudio se relaciona con los Objetivos de Desarrollo Sostenible vinculados con la eficiencia energética, la modernización industrial, la producción responsable y la acción climática. Aun así, el GLP continúa siendo un combustible fósil, por lo que se analiza como una alternativa de transición y no como una solución de descarbonización total. Los resultados podrán servir como referencia para estudios similares, siempre que los cálculos se actualicen con la información operativa, espacial y económica de la empresa donde se pretenda realizar la inversión.

# Capítulo 1

## 1 Fundamentación Teórica

### 1.1 Antecedentes Investigativos

Sagaf et al. (2020) evaluaron la degradación de la eficiencia en dos calderos de una central termoeléctrica a carbón, cada uno con una capacidad de 660 MW, aplicando el método indirecto de balance térmico basado en la norma ASME PTC 4. Los autores procesaron los resultados de múltiples pruebas de desempeño y emplearon regresión lineal para estimar la variación temporal del rendimiento termodinámico. El estudio determinó tasas de deterioro del 0,19 % y 0,44 % anual para cada unidad, evidenciando que las propiedades fisicoquímicas del carbón influyeron directamente en las pérdidas de calor registradas, un antecedente que sustenta la rigurosidad del método indirecto para segregar las pérdidas energéticas y modelar tendencias operativas, sin embargo de lo cual sus hallazgos no son extrapolables al presente caso de estudio debido a las asimetrías en la escala de potencia, la configuración geométrica de los calderos y la naturaleza del combustible.

Zhao et al. (2024) analizaron la modernización de los quemadores en un caldero subcrítico a carbón de 330 MW sometido a un régimen de carga ultra baja, cuyo diseño propuesto integró un quemador auxiliar de Gas Natural Licuado (GNL) con ignición enriquecida con oxígeno, simulando de este modo el comportamiento fluidodinámico de la combustión mediante Chemkin, Fluent y un modelo de disipación de remolinos, al operar con un factor de carga del 25 %, el soporte del GNL garantizó la estabilidad de la llama y redujo las emisiones de NO<sub>x</sub> de 380 a 316 mg/m<sup>3</sup> (corregidas al 6 % de O<sub>2</sub> en base seca). El valor de este trabajo radica en demostrar cómo la inyección de hidrocarburos gaseosos optimiza la estabilidad térmica y cómo las herramientas computacionales respaldan las decisiones de reconversión, aunque su alcance difiere de la presente investigación al emplear GNL exclusivamente como combustible de apoyo en una unidad de potencia a carbón, distando significativamente del escenario de sustitución total de Búnker C por GLP en calderos pirotubulares.

En un enfoque a menor escala, Soliman et al. (2026) investigaron la co-combustión de diésel y GLP en un quemador experimental de doble remolino dotado de una cámara de premezcla, cuyos ensayos se ejecutaron a una potencia térmica constante de 20 kW, con una relación de equivalencia de 0,8 y proporciones másico-energéticas diésel-GLP variando desde 100/0 hasta 70/30. Para la mezcla 70/30, se alcanzó una eficiencia térmica máxima del 51 %, acompañada de una mitigación del 95 % en las emisiones de monóxido de carbono (CO) y una contracción del 40 % en la longitud de la llama frente al uso exclusivo de diésel, paralelamente, el enriquecimiento con GLP elevó las emisiones de NO como consecuencia del incremento en la temperatura adiabática de llama, aunque dentro de rangos operativos aceptables. Este antecedente comprueba que la aerodinámica del quemador interviene directamente sobre la transferencia de calor y la formación de contaminantes, pero al tratarse de un montaje experimental operando en régimen dual, no valida la sustitución íntegra del combustible en una instalación industrial.

En el contexto ecuatoriano, Saa Zambrano y Valero Pérez (2024) ejecutaron un análisis descriptivo sobre la operación con diésel y GLP para la generación de vapor en una planta de alimento balanceado, mediante el procesamiento de registros anuales de consumo energético, producción y mantenimiento, los autores determinaron que el GLP reportó ventajas tanto en la estabilidad del suministro de vapor como en la estructura de costos operativos, asimismo, contrastaron el desempeño operativo entre un caldero de combustible dual y una unidad a gas de reciente adquisición. Esta investigación aporta evidencia local sobre la necesidad de correlacionar el mantenimiento con las variables termodinámicas; no obstante, sus conclusiones financieras están supeditadas a la tecnología específica de los equipos, el periodo de evaluación y las tarifas vigentes, por lo que resulta inviable trasladar su dictamen al binomio Búnker C–GLP sin desarrollar un nuevo modelo económico e ingenieril.

En una línea similar, Jaens Parra y Chalen Arana (2024) estructuraron una propuesta para la conversión de calderos industriales de diésel a GLP en Ecuador, su desarrollo abarca la fundamentación termodinámica de los equipos, el poder calorífico de los combustibles y el

marco normativo de seguridad industrial aplicable. El estudio reconoce expresamente que la transición energética exige readecuaciones en las boquillas de los quemadores, los lazos de control, la ventilación forzada y los dispositivos de alivio. La pertinencia de este trabajo para la presente tesis reside en la identificación del checklist técnico y regulatorio indispensable previo a la reconversión, sin embargo, su limitación frente al caso actual radica en la ausencia del Búnker C, un residual que impone requerimientos térmicos y de bombeo mucho más severos que los demandados por el diésel, además de una gestión exhaustiva de residuos carbonosos.

La revisión del estado del arte demuestra que el método indirecto es el estándar idóneo para cuantificar las pérdidas térmicas; que la migración hacia gases combustibles altera significativamente la geometría de la llama y el perfil de emisiones; y que la rentabilidad de una reconversión tecnológica es intrínseca a la realidad operativa de cada planta, dada la heterogeneidad de los estudios previos respecto a la escala térmica, la naturaleza del hidrocarburo y el contexto manufacturero, la literatura disponible carece de evidencia empírica suficiente para garantizar que la transición a GLP resulte económicamente viable o termodinámicamente equivalente para la industria atunera de Manta.

A partir de la literatura consultada, se evidencia una brecha investigativa referida a la falta de integración simultánea entre el balance de materia y energía, el inventario ambiental de emisiones, el prediseño de la infraestructura presurizada y la evaluación financiera de flujos incrementales, aplicados específicamente a calderos pirotubulares operados con Búnker C en el procesamiento de atún. El presente trabajo atiende esta necesidad metodológica a través de un estudio de caso técnico referencial. Su contribución disciplinar estriba en evaluar holísticamente las dimensiones técnica, ambiental y económica, partiendo de la premisa de que la optimización termodinámica o la mitigación de externalidades ambientales no garantizan de forma aislada la viabilidad financiera del proyecto.

## **1.2 Bases Teóricas**

### **1.2.1 Fundamentos Teóricos**

#### **1.2.1.1 Transición Energética Global y Sostenibilidad Industrial**

La transición energética industrial abarca la evolución estructural de las fuentes de energía, el equipamiento tecnológico y las rutinas operativas inherentes a la manufactura, un proceso que trasciende la simple sustitución de un energético por otro al integrar estrategias de eficiencia, recuperación de calor residual, electrificación, optimización estequiométrica de la combustión y disminución de la intensidad de emisiones por unidad de producto, por lo cual la viabilidad de adoptar cualquiera de estos vectores está condicionada directamente por la demanda térmica, la infraestructura de soporte instalada, la confiabilidad del suministro y la factibilidad financiera del proyecto.

La industria constituye uno de los principales sectores consumidores de energía a escala mundial, por lo que la mejora de su eficiencia energética representa una estrategia relevante para reducir costos operativos y emisiones asociadas al consumo de combustibles. La IEA actualmente reporta que la industria es un sector central de la demanda energética mundial y dispone de datos específicos de consumo industrial. Dicha magnitud subraya la urgencia de optimizar el desempeño termodinámico de las instalaciones, particularmente en operaciones intensivas que demandan vapor, calentamiento directo o altas temperaturas.

A nivel de planta, la mitigación de emisiones se ejecuta mediante diversas vías de ingeniería, mientras la mejora de la eficiencia reduce el requerimiento másico de combustible para alcanzar una determinada transferencia de calor, la reconversión tecnológica modifica el perfil químico de los gases de combustión. En una planta industrial, las emisiones pueden reducirse mediante mejoras en la eficiencia o a través de un cambio de combustible. La primera opción disminuye la cantidad de energía requerida para producir el mismo nivel de calor, mientras que la segunda modifica la composición de los gases generados. Sin embargo, utilizar un combustible con menor factor de emisión no garantiza que el proyecto

sea sostenible. También deben considerarse la inversión, los costos de operación, los riesgos de seguridad y la disponibilidad futura del combustible.

Bajo este marco analítico, el GLP se evalúa estrictamente como un energético de transición frente al Búnker C. Su utilización en fase gaseosa puede minimizar la generación de inquemados sólidos y presenta menor potencial en la liberación de óxidos de azufre, facilitando además la modulación precisa de la mezcla aire-combustible en los quemadores. Pese a estas ventajas operativas, el GLP conserva su naturaleza fósil y genera dióxido de carbono al oxidarse, por consiguiente, la reconversión analizada no constituye una descarbonización absoluta, sino una etapa de mitigación intermedia cuyo impacto real exige cuantificarse bajo las fronteras termodinámicas y financieras del caso de estudio.

La sostenibilidad industrial no depende únicamente de alcanzar una mayor eficiencia térmica. Una alternativa con ventajas ambientales puede ocasionar gastos operativos más altos o requerir medidas adicionales de seguridad, como sucede con el almacenamiento de gases a presión. Por esta razón, la comparación entre Búnker C y GLP considera el consumo energético, las emisiones, la infraestructura requerida y los resultados financieros. De esta manera se evita asumir que el cambio de combustible será favorable en todos los aspectos.

En Ecuador, este análisis se relaciona con los compromisos climáticos establecidos por el país. La Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional, presentada en 2025, incluye medidas para reducir emisiones e incorporar criterios climáticos en las actividades productivas. La investigación aporta un procedimiento para evaluar una posible reconversión de combustible en el sector industrial. No obstante, sus resultados corresponden a un caso referencial y no permiten comprobar el cumplimiento de una meta climática nacional.

#### **1.2.1.2 Alineación Estratégica con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**

La correspondencia de este estudio con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se aborda desde una perspectiva técnica orientada a la eficiencia y reducción de emisiones en la planta, proporcionando una arquitectura de datos para la sostenibilidad industrial.

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible establece un conjunto de objetivos orientados a promover un desarrollo económico, social y ambiental equilibrado (Naciones Unidas, 2015).:

**ODS 3 (Salud y Bienestar):** La sustitución proyectada mitiga en la fuente la emisión de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y material particulado (PM) generados por el Búnker C, reduciendo la carga contaminante directa de la planta térmica.

**ODS 7 (Energía Asequible y no Contaminante):** El proyecto incrementa la eficiencia térmica del caldero, reduciendo directamente la tasa de energía primaria requerida para transferir una magnitud equivalente de calor útil a la red de vapor.

**ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura):** Se plantea una reconversión tecnológica profunda de la matriz térmica local, demandando el acople de quemadores específicos, estaciones de almacenamiento y trenes de regulación e instrumentación.

**ODS 12 (Producción y Consumo Responsables):** El modelo optimiza el consumo específico de combustible por cada libra de vapor generada y elimina las horas-equipos invertidas en la remoción mecánica de incrustaciones carbonosas.

**ODS 13 (Acción por el Clima):** El uso del GLP reduce las emisiones directas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) por combustión, aportando parámetros técnicos aplicables a las metas de modernización industrial y acción climática.

#### **1.2.1.3 Fundamentos Termodinámicos, Balance de Masa y Energía bajo Código ASME**

##### **PTC 4**

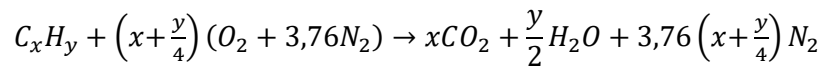
La evaluación energética de una caldera requiere establecer un volumen de control que incluya las entradas de combustible, aire y agua de alimentación, así como las salidas de vapor, gases de combustión, purgas y pérdidas de calor hacia el ambiente, bajo condiciones de régimen estacionario, la masa y la energía acumuladas dentro del sistema se consideran constantes, por lo que los flujos de entrada deben guardar correspondencia con los flujos de salida.

El código ASME PTC 4-2013 establece procedimientos para evaluar el desempeño de generadores de vapor alimentados con combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, entre

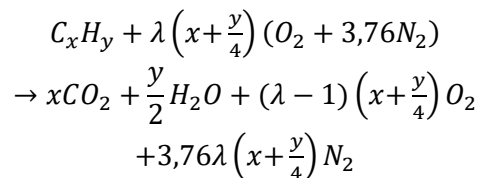
cuyos componentes principales se encuentran la definición de los límites del sistema, la determinación de la capacidad, el balance de energía, el cálculo de pérdidas y el análisis de incertidumbre. En la presente investigación se utilizan sus criterios como referencia para el modelado termodinámico; por tanto, los resultados no representan una prueba de desempeño certificada bajo la totalidad de los requisitos del código (American Society of Mechanical Engineers [ASME], 2013).

- **Balance de masa en la combustión**

Para un hidrocarburo genérico  $C_xH_y$ , la reacción con aire teórico puede expresarse como:



Esta ecuación representa una combustión completa en condiciones estequiométricas. En una operación real se suministra una cantidad de aire superior a la teórica para favorecer la oxidación del combustible. Al incorporar el factor de aire  $\lambda$ , la reacción idealizada queda expresada como:



Donde:

- $\lambda = 1$  representa el aire estequiométrico.
- $\lambda > 1$  indica exceso de aire.
- $\lambda < 1$  representa una condición con aire insuficiente.

El porcentaje de exceso de aire se determina mediante:

$$EA = (\lambda - 1) \times 100$$

En las calderas industriales, una cantidad insuficiente de aire puede favorecer la formación de monóxido de carbono, hollín y combustible no quemado. En cambio, un exceso elevado incrementa el flujo másico de gases que debe calentarse y expulsarse por la

chimenea. Por esta razón, la regulación de la relación aire-combustible debe buscar una combustión estable con el menor exceso de aire técnicamente admisible.

La ecuación general de los hidrocarburos constituye una simplificación. Para el Búnker C, el balance preciso requeriría conocer su composición elemental en carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno, humedad y cenizas. Debido al carácter referencial del estudio, las propiedades no suministradas por la empresa se representan mediante valores técnicos documentales y deben identificarse como supuestos de modelación.

- **Balance de energía**

La energía térmica suministrada por el combustible se expresa como:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{m}_f \times PCI_f$$

Donde:

- $\dot{Q}_{entrada}$ : energía suministrada por el combustible.
- $\dot{m}_f$ : flujo másico de combustible.
- $PCI_f$ : poder calorífico inferior del combustible.

La energía útil transferida al agua para producir vapor se calcula mediante:

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \dot{m}_v(h_v - h_{aa})$$

Donde:

- $\dot{m}_v$ : flujo másico de vapor.
- $h_v$ : entalpía específica del vapor producido.
- $h_{aa}$ : entalpía específica del agua de alimentación.

La eficiencia térmica por el método directo se obtiene mediante:

$$\eta_{directa} = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\dot{Q}_{entrada}} \times 100$$

Este procedimiento relaciona la energía absorbida por el fluido de trabajo con la energía aportada por el combustible. Su aplicación requiere que ambos términos correspondan al mismo periodo y condición operativa (Cengel & Boles, 2019).

- **Método indirecto o método de pérdidas**

El método indirecto determina la eficiencia a partir de la diferencia entre la energía suministrada y las pérdidas identificadas:

$$\eta_{indirecta} = 100 - \sum_{i=1}^n L_i$$

Esta expresión es válida cuando cada pérdida  $L_i$  se encuentra expresada en puntos porcentuales respecto de la energía de entrada. Si las pérdidas se expresan como fracciones, la ecuación debe escribirse como:

$$\eta_{indirecta} = 1 - \sum_{i=1}^n l_i$$

Las principales pérdidas consideradas en un balance simplificado corresponden a los gases de chimenea, la radiación y convección de la carcasa, la purga y la combustión incompleta. El método indirecto no debe confundirse con la eficiencia de combustión reportada por determinados analizadores portátiles, debido a que esta última suele considerar principalmente la pérdida asociada a los gases de escape y puede omitir otras pérdidas del generador de vapor.

- **Pérdida por gases secos de combustión**

La pérdida de calor sensible transportado por los gases secos puede expresarse como:

$$L_{gs} = \frac{m_{gs} \bar{c}_{p,gs} (T_g - T_a)}{PCI_f} \times 100$$

Donde:

- $m_{gs}$ : masa de gases secos por unidad de combustible.
- $\bar{c}_{p,gs}$ : calor específico medio de los gases secos.
- $T_g$ : temperatura de los gases a la salida.
- $T_a$ : temperatura del aire de referencia.
- $PCI_f$ : poder calorífico inferior del combustible.

La acumulación de hollín no constituye una pérdida independiente dentro de esta ecuación, pero puede reducir la transferencia de calor y elevar la temperatura de salida de los gases, aumentando indirectamente  $L_{gs}$ .

- **Pérdida asociada al vapor de agua**

La masa de vapor de agua en los productos de combustión incluye el agua formada por la oxidación del hidrógeno, la humedad del combustible y la humedad aportada por el aire:

$$m_{H_2O} = 9H + M_f + M_a$$

Donde  $H$  es la fracción másica de hidrógeno,  $M_f$  representa la humedad del combustible y  $M_a$  la humedad incorporada con el aire.

La pérdida correspondiente puede representarse mediante:

$$L_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}(h_{H_2O,g} - h_{H_2O,ref})}{PCI_f} \times 100$$

La base de entalpía empleada en esta expresión debe ser compatible con el PCI, de manera que no se debe utilizar PCI en el denominador y, al mismo tiempo, incorporar una pérdida formulada para PCS porque esa combinación produciría una doble contabilización del calor de condensación.

- **Pérdida por radiación y convección**

La pérdida térmica desde la envolvente de la caldera hacia el ambiente se expresa como:

$$L_{rc} = \frac{\dot{Q}_{rc}}{\dot{m}_f PCI_f} \times 100$$

Su magnitud depende de la capacidad, la carga operativa, la temperatura superficial, el estado del aislamiento y las condiciones ambientales, por lo que en una evaluación referencial puede estimarse mediante curvas técnicas, debiendo identificarse

obligatoriamente como un valor adoptado cuando no exista una medición superficial completa.

- **Pérdida por purga**

La purga elimina sólidos disueltos y permite controlar la calidad del agua de la caldera, pero también extrae energía térmica del sistema, por lo cual su pérdida asociada puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$L_{purga} = \frac{\dot{m}_p(h_p - h_{aa})}{\dot{m}_f PCI_f} \times 100$$

Donde:

- $\dot{m}_p$ : flujo másico de purga.
- $h_p$ : entalpía del agua de purga.
- $h_{aa}$ : entalpía del agua de alimentación.

Cuando el porcentaje de purga no se encuentre disponible, esta pérdida debe declararse una limitación del modelo y no asignarse arbitrariamente (American Society of Mechanical Engineers [ASME], 2013).

- **Aplicación al cambio de combustible**

La sustitución de Búnker C por GLP modifica la composición de los gases, la cantidad de agua formada durante la combustión, el aire requerido y el comportamiento de los depósitos sobre las superficies de transferencia térmica, permitiendo que el GLP pueda operar con un menor exceso de aire cuando existe un control adecuado de combustión, aunque esto no elimina las pérdidas inherentes por chimenea, radiación, purga o humedad.

En esta investigación, la comparación se realiza sobre una misma base de energía útil y utilizando el PCI de cada combustible, esto permite estimar la cantidad de Búnker C o GLP necesaria para suministrar una demanda térmica equivalente, evitando comparar directamente unidades volumétricas que poseen densidades y poderes caloríficos diferentes.

#### **1.2.1.4 Combustibles Fósiles y su Impacto Ambiental**

En el sector industrial, la matriz de combustibles fósiles abarca hidrocarburos gaseosos, destilados líquidos y las fracciones residuales derivadas de la refinación del

petróleo. Dentro de esta última clasificación figura el Fuel Oil No. 6, comercialmente conocido como Búnker C. Este producto corresponde a las colas o fracciones pesadas resultantes de la destilación y separación de los componentes ligeros, destinándose primordialmente a la generación térmica, procesos manufactureros pesados y propulsión marítima (U.S. Energy Information Administration [EIA], s. f.).

El Búnker C carece de una formulación química estándar; sus propiedades fisicoquímicas fluctúan en función de la naturaleza del crudo de origen, el esquema de refinación y los procesos de mezcla (*blending*) previos a su comercialización, por naturaleza, exhibe una densidad y viscosidad considerablemente superiores a las de los destilados medios, concentrando proporciones variables de azufre, humedad, cenizas inorgánicas, asfáltenos y metales pesados. Debido a estas variaciones, el análisis de una instalación debe apoyarse en el certificado de calidad del combustible suministrado o en una ficha técnica confiable. En esta investigación no se contó con un análisis de laboratorio del Búnker C utilizado por la empresa. Por ello, sus propiedades se obtuvieron de fuentes documentales y se emplearon únicamente como datos de referencia para desarrollar el modelo.

La elevada viscosidad del Búnker C dificulta su bombeo y atomización cuando se encuentra a temperatura ambiente. Antes de ingresar al quemador, el combustible debe calentarse hasta alcanzar una viscosidad compatible con el sistema de inyección. La temperatura requerida depende de las propiedades del producto, la geometría del quemador y la presión de trabajo. Este acondicionamiento consume vapor o electricidad, por lo que su demanda energética debe incluirse en la evaluación general del sistema.

El perfil de emisiones liberadas depende tanto de la composición elemental del crudo como de la estequiometría operativa, durante la combustión, el azufre contenido en el hidrocarburo reacciona mayoritariamente para formar dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), mientras que una fracción minoritaria interviene en la nucleación de sulfatos y material particulado secundario. La tasa másica de emisión de  $\text{SO}_2$  es directamente proporcional a la concentración de azufre en el fluido y al caudal de consumo. Por tal motivo, carece de validez metodológica asignar una concentración de emisión genérica sin determinar previamente las

propiedades del combustible y normalizar los gases de escape bajo condiciones de referencia (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 1998).

Por su parte, la generación de material particulado obedece a dos mecanismos concurrentes que son el arrastre de cenizas inorgánicas inertes y la combustión incompleta de los asfáltenos y fracciones pesadas, estando la magnitud de estos inquemados fuertemente condicionada por el espectro de atomización, el exceso de aire, la temperatura adiabática de llama, la modulación de carga y el desgaste mecánico del quemador, de modo que una desviación en estos parámetros detona la formación de hollín y propicia incrustaciones sobre el haz tubular, cuyas capas de aislamiento elevan la resistencia conductiva del metal, incrementan la temperatura de salida de los gases por chimenea y fuerzan paradas operativas para intervenciones de limpieza.

De forma análoga, la síntesis de óxidos de nitrógeno (NOx) responde a mecanismos asociados con las altas temperaturas de llama (*thermal NOx*) y, en los residuales pesados, con la oxidación del nitrógeno molecular ligado químicamente al combustible (*fuel NOx*). Por otro lado, la presencia de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos volátiles (COVs) acusa una oxidación incompleta, síntoma ineludible de deficiencias en la mezcla turbulenta, insuficiencia de aire comburente o tiempos de residencia inadecuados en la cámara, finalmente, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) surge como el producto estequiométrico inherente a la oxidación del carbono, constituyendo el principal vector de gases de efecto invernadero (GEI) de este tipo de instalaciones.

Evalutados desde el impacto en la calidad del aire, tanto el SO<sub>2</sub> como el material particulado figuran como contaminantes críticos dentro de las directrices de la Organización Mundial de la Salud. La exposición a sus perfiles de inmisión está correlacionada con afectaciones agudas en los sistemas respiratorio y cardiovascular, sin embargo, dictaminar el riesgo sanitario epidemiológico sobre una comunidad requiere modelaciones de dispersión de plumas, monitoreos continuos y estudios de vulnerabilidad poblacional, vectores de evaluación que exceden las fronteras de esta investigación (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021).

En base a estos principios, la huella ambiental del Búnker C no es simplemente el resultado de su estado como combustible residual, más bien, proviene de un sistema multivariable que involucra la solicitud térmica, la formulación del lote, la aerodinámica del quemador y el rigor operativo de la planta. Para garantizar la validez técnica del análisis comparativo frente al GLP, el modelo restringe las variables a la demanda de energía útil entregada, cruzándola exclusivamente con factores de emisión estandarizados y los regímenes operativos documentados, eliminando los sesgos asociados a la extrapolación de datos ajenos a la instalación referencial.

## **1.2.2 Sustitución del Búnker por Gas Licuado de Petróleo (GLP)**

### **1.2.2.1 Caracterización Técnica y Energética del GLP**

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) es una mezcla de hidrocarburos ligeros compuesta predominantemente por propano ( $C_3H_8$ ), butano ( $C_4H_{10}$ ) y trazas de compuestos análogos, siendo un energético que se recupera directamente durante el procesamiento del gas natural, la estabilización del crudo y las etapas de refinación. Para optimizar su logística de almacenamiento y transporte, el fluido se mantiene en estado líquido mediante compresión isoterma, no obstante, su inyección en los quemadores exige que retorne a la fase gaseosa, requiriendo en aplicaciones industriales el uso de vaporizadores.

En el marco regulatorio ecuatoriano, las especificaciones de calidad del combustible se rigen por la norma NTE INEN 675, por lo que resulta imperativo no confundir este estándar de composición con la NTE INEN 2261, la cual regula exclusivamente el diseño e inspección de los recipientes a presión. En paralelo, el código NFPA 58 dicta los lineamientos internacionales de seguridad para el almacenamiento, trasiego y utilización del gas, aunque no legisla sobre variables termodinámicas como el poder calorífico o el rendimiento de la combustión, en consecuencia, el diseño del proyecto debe declarar explícitamente la edición normativa utilizada para dimensionar la infraestructura y las distancias de seguridad.

Desde el análisis termodinámico, el GLP exhibe un Poder Calorífico Inferior (PCI) másico superior al del fuel oil residual. Como línea base, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) consigna valores predeterminados de 47,3 MJ/kg

para el GLP frente a 40,4 MJ/kg para el residual pesado (IPCC, 2006). Estos parámetros actúan como constantes de modelación, pero en la práctica operativa deben sustituirse por los datos reportados en el certificado de calidad del proveedor que despache el fluido a la planta.

Es fundamental advertir que esta superioridad térmica másica no equivale a una mayor densidad energética volumétrica, el dimensionamiento de un tanque de almacenamiento es función del PCI, la gravedad específica del hidrocarburo y la eficiencia global del caldero. Dada la baja densidad física del GLP en fase líquida respecto al Búnker C, el requerimiento volumétrico (galones) para suministrar una carga térmica equivalente suele ser mayor, aunque este diferencial se ve parcialmente atenuado por el incremento en la eficiencia de transferencia de calor.

Dinámicamente, la inyección del GLP en fase gaseosa promueve una mezcla altamente homogénea con el aire comburente, permitiendo ajustar la relación estequiométrica sin la penalización energética que exigen los sistemas de atomización mecánica. Bajo un diseño de quemador idóneo, esto minimiza el requerimiento de exceso de aire y estabiliza la aerodinámica de la llama, sin embargo, la combustión completa no es un fenómeno espontáneo garantizado, una deficiente calibración del lazo de control puede desencadenar la formación de monóxido de carbono (CO), arrastre de hidrocarburos no quemados e inestabilidades acústicas en el hogar.

Al contrastarlo con el Búnker C, el GLP carece casi por completo de azufre y no acarrea la carga inorgánica (cenizas) típica de los petróleos residuales, esta pureza química mitiga drásticamente la nucleación de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), suprime la emisión de material particulado primario y evita la sinterización de depósitos aislantes sobre el haz tubular, aun así, la ratificación de estas ventajas operativas demanda el cotejo continuo con las fichas técnicas del gas y la ejecución de mediciones isocinéticas *a posteriori*.

El bajo contenido de azufre del GLP reduce el riesgo de corrosión ocasionado por la condensación de ácido sulfúrico a bajas temperaturas. Esta característica permite trabajar con temperaturas menores en los gases de salida y facilita la recuperación de calor mediante

equipos como los economizadores. Sin embargo, los gases no deben enfriarse sin un criterio técnico. La temperatura mínima de salida deberá establecerse considerando su composición, el punto de rocío y los materiales utilizados en la chimenea.

Para efectos de la presente investigación, ante la omisión de datos de laboratorio por parte de la empresa atunera, las propiedades fisicoquímicas del GLP se asumen mediante valores de literatura técnica, esta parametrización permite cerrar los balances de materia y energía del modelo general, bajo la consigna de que los resultados financieros deberán recalibrarse con las condiciones de despacho comercial antes de comprometer el gasto de capital.

### **1.2.2.2 Evaluaciones Comparativas de Combustibles en la Industria**

La evaluación de viabilidad para una transición energética en calderos industriales exige normalizar la comparación bajo una demanda constante de energía térmica útil. Carece de validez metodológica contrastar directamente galones facturados o tarifas nominales dadas las profundas asimetrías en gravedad específica, poder calorífico, eficiencia de combustión y unidades de comercialización entre el Búnker C y el GLP, razón por la cual el rigor ingenieril impone el uso de indicadores estandarizados tales como el costo nivelado por unidad de energía útil ( $\$/MMBtu$ ), el consumo específico (kg combustible/tonelada de vapor) y el Costo de Ciclo de Vida (LCC).

El Búnker C necesita acondicionarse antes de ingresar al quemador. Generalmente se requiere calentarlo, bombearlo, filtrarlo y atomizarlo; en algunos casos también se agregan aditivos para controlar la formación de lodos. Durante la combustión pueden acumularse cenizas y restos de combustible en los tubos de la caldera. Estos depósitos disminuyen la transferencia de calor, elevan la temperatura de los gases de salida y obligan a detener el equipo para efectuar limpiezas mecánicas.

El GLP, al dispensar de los sistemas de atomización e inhibir la formación de incrustaciones, conserva la eficiencia del caldero en valores cercanos al diseño durante ciclos operativos más extensos, esto se traduce en una drástica reducción del mantenimiento correctivo por deshollinado. Sin embargo, el sistema gasífero demanda calibraciones y

revisiones periódicas sobre el tren de válvulas, los reguladores de presión, el lazo de ignición electrónica y la instrumentación de seguridad, por lo que es técnicamente inexacto afirmar que la reconversión suprime la totalidad del presupuesto de mantenimiento.

La conversión a GLP requiere equipos que no forman parte del sistema actual. Entre ellos se encuentran los tanques a presión, las bombas de transferencia, los vaporizadores, el tren de regulación y medición, las líneas de purga, las válvulas de alivio y los detectores de gas. Los recipientes deberán cumplir los criterios aplicables de ASME Sección VIII considerando los criterios técnicos establecidos en la normativa aplicable para recipientes a presión, mientras que el diseño y la instalación del sistema tendrán que considerar la NFPA 58. Estos requerimientos aumentan la inversión inicial e incorporan riesgos que deberán controlarse durante la operación.

En la esfera ambiental, la comparativa debe indexarse por unidad de energía liberada, considerando que el IPCC reporta factores de emisión por defecto de 77.400 kg de CO<sub>2</sub>/TJ para el combustible residual y 63.100 kg de CO<sub>2</sub>/TJ para el gas licuado (**IPCC, 2006**). Este diferencial corrobora que el GLP posee una menor intensidad de carbono por megajulio entregado, pero ratifica su estatus como combustible fósil.

La evaluación económica debe comparar los costos que dejarían de existir con los nuevos gastos ocasionados por el uso de GLP. Entre los posibles ahorros se encuentran la eliminación del precalentamiento, el menor uso de aditivos y la reducción de las paradas destinadas a limpiar los tubos. En cambio, el nuevo sistema deberá cubrir la inversión inicial, el consumo de energía de los vaporizadores, el mantenimiento de los equipos a presión, las inspecciones obligatorias y las variaciones en el precio del GLP.

La decisión de sustituir el combustible no puede basarse únicamente en una mejora de la eficiencia o en la disminución estimada de las emisiones. También debe comprobarse que el sistema mantenga la producción de vapor, que el quemador sea compatible con el GLP y que exista espacio suficiente para cumplir las distancias de seguridad. A estos criterios se suman la disponibilidad del combustible y el comportamiento de los indicadores financieros frente a posibles cambios de precios.

**Tabla 1. Tabla comparativa entre Bunker C y GLP.**

| <b>Criterio</b>                              | <b>Búnker C</b>                                                            | <b>GLP</b>                                           |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Estado de almacenamiento</b>              | Líquido a presión y temperatura cercanas a la ambiental.                   | Líquido presurizado.                                 |
| <b>Suministro al quemador</b>                | Líquido precalentado y atomizado mecánicamente.                            | Fase gaseosa (previo paso por vaporizador).          |
| <b>Poder Calorífico Inferior (PCI)</b>       | 40,4 MJ/kg                                                                 | 47,3 MJ/kg                                           |
| <b>Densidad energética másica</b>            | Menor                                                                      | Mayor                                                |
| <b>Densidad volumétrica (física)</b>         | Mayor (requiere menos volumen por galón).                                  | Menor (requiere mayor volumen por galón).            |
| <b>Acondicionamiento previo</b>              | Tren de precalentamiento térmico, filtración y bombeo de alta presión.     | Red de vaporización y tren de regulación de presión. |
| <b>Formación de inquemados/cenizas</b>       | Alta dependencia de la calidad del lote y la estequiometría.               | Prácticamente nula.                                  |
| <b>Formación de hollín</b>                   | Elevado potencial bajo deficiencia de aire comburente.                     | Mínimo potencial (no absoluto).                      |
| <b>Emisión referencial de CO<sub>2</sub></b> | 77.400 kg/TJ                                                               | 63.100 kg/TJ                                         |
| <b>Contenido de Azufre</b>                   | Alto y variable. Principal precursor de SO <sub>2</sub> y ácido sulfúrico. | Trazas despreciables.                                |

|                                          |                                                                                          |                                                                                          |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Enfoque de mantenimiento</b>          | Remoción mecánica de depósitos ( <i>fouling</i> ), limpieza de boquillas de atomización. | Calibración de instrumentación, prueba de válvulas de alivio y reguladores.              |
| <b>Infraestructura de almacenamiento</b> | Tanque atmosférico convencional (API 650) con dique de contención.                       | Recipiente a presión (ASME) condicionado a distancias de seguridad (NFPA 58).            |
| <b>Riesgos operativos críticos</b>       | Derrame confinado, ignición térmica, exposición de operarios a fluidos calientes.        | Fuga de gas pesado, BLEVE, atmósfera explosiva, sobrepresión no controlada.              |
| <b>Estructura de costos (Evaluación)</b> | Indexada al precio por galón, sumando consumo eléctrico/térmico auxiliar y aditivos.     | Indexada al precio por kilogramo, sumando costo del vaporizador y amortización de CAPEX. |

*Nota. Los valores caloríficos y los factores de emisión de CO<sub>2</sub> obedecen a las directrices predeterminadas del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Las propiedades termodinámicas reales deben calibrarse mediante certificados de laboratorio emitidos por el proveedor de hidrocarburos del proyecto.*

### 1.2.2.3 Marco Normativo y Regulatorio Ambiental

La evaluación de la sustitución de Búnker C por Gas Licuado de Petróleo debe considerar disposiciones relacionadas con eficiencia energética, emisiones atmosféricas, calidad del combustible, diseño de instalaciones, almacenamiento y seguridad industrial. Los posibles beneficios técnicos y ambientales no autorizan automáticamente la ejecución del proyecto. Antes de implementar la reconversión, la empresa deberá obtener los permisos correspondientes y cumplir los procesos de revisión e inspección establecidos por las autoridades.

#### **1.2.2.4 Política energética y climática**

En Ecuador, la Ley Orgánica de Eficiencia Energética establece las disposiciones generales para promover un aprovechamiento eficiente, racional y sostenible de la energía. Su relación con la investigación se encuentra en la necesidad de evaluar el consumo energético y mejorar el aprovechamiento de los recursos dentro de los procesos productivos. No obstante, la ley no debe interpretarse como una obligación automática de sustituir Búnker C por GLP ni como una garantía de acceso a incentivos económicos para la instalación analizada (Asamblea Nacional del Ecuador, 2019).

En materia climática, Ecuador presentó su Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional en febrero de 2025, este documento orienta las acciones nacionales de mitigación y adaptación para el periodo correspondiente, incluyendo medidas relacionadas con la energía y los procesos productivos. La sustitución analizada puede guardar relación con esos lineamientos por la reducción proyectada de emisiones directas; sin embargo, una NDC constituye un compromiso nacional y no reemplaza las obligaciones técnicas, ambientales o administrativas aplicables a una instalación industrial particular.

#### **1.2.2.5 Regulación de emisiones atmosféricas**

El control de las emisiones provenientes de fuentes fijas se sustenta en el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente y en los anexos expedidos mediante el Acuerdo Ministerial 097-A. El Acuerdo Ministerial 097-A fue publicado en la Edición Especial del Registro Oficial n.º 387, el 4 de noviembre de 2015. En su Anexo 3 se encuentra la Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas, que incluye límites y procedimientos para evaluar las emisiones producidas por equipos de combustión, entre ellos las calderas.

Para seleccionar el límite aplicable se debe conocer la categoría de la fuente, el combustible utilizado, la fecha en que comenzó a operar y las condiciones de referencia exigidas por la norma. En el caso de las calderas, los resultados deben compararse con la tabla específica del Anexo 3 y expresarse bajo las condiciones de oxígeno y base seca establecidas en el documento, debido al carácter referencial de esta investigación y a la

ausencia de la fecha de autorización individual de cada equipo, la comparación ambiental representa una evaluación preliminar y no una certificación oficial de cumplimiento.

La utilización de GLP puede disminuir las emisiones asociadas al contenido de azufre y a la presencia de cenizas del Búnker C. Sin embargo, el sistema continúa generando dióxido de carbono y puede producir óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y otros compuestos cuando la combustión no se encuentra correctamente regulada. En consecuencia, la conformidad ambiental deberá comprobarse después de una eventual implementación mediante mediciones realizadas de acuerdo con los métodos reconocidos y con los requisitos de la autoridad ambiental.

#### **1.2.2.6 Normas técnicas para instalaciones y almacenamiento de GLP**

La calidad del GLP utilizado en el país debe verificarse con la especificación técnica aplicable al producto, mientras que la infraestructura requiere considerar normas diferentes según el componente analizado. La NTE INEN 2260 contiene disposiciones para instalaciones de gases combustibles de uso residencial, comercial e industrial. La NTE INEN 2261 se relaciona con determinados tanques para gases a baja presión, mientras que el RTE INEN 008 establece requisitos para tanques y recipientes sometidos a presión.

Cada norma deberá aplicarse de acuerdo con el componente que regula. El tanque, las tuberías, los reguladores, las válvulas de alivio, el vaporizador y los dispositivos de seguridad tienen requisitos diferentes, por lo que el diseño del sistema no puede justificarse con una sola disposición técnica. En el diseño definitivo deberá verificarse la edición vigente, la presión de trabajo, la capacidad del almacenamiento, las distancias de separación, los materiales, las pruebas de hermeticidad y los procedimientos de inspección aplicables.

Los códigos NFPA 54 y NFPA 58 pueden emplearse como referencias complementarias cuando sean reconocidos por la autoridad competente o incorporados expresamente en las especificaciones del proyecto, considerando que la NFPA 58 contiene criterios para el almacenamiento, manejo y utilización del GLP mientras que la NFPA 54 aborda instalaciones de gas combustible dentro de su campo de aplicación, por lo que su

utilización en la investigación no implica que sustituyan las normas ecuatorianas ni que se encuentren homologados automáticamente en su totalidad.

#### **1.2.2.7 Requisitos locales y autorización del proyecto**

La instalación también deberá cumplir los requisitos municipales relacionados con el uso de suelo, la prevención de incendios y la regularización ambiental. Los permisos dependerán de la ubicación, la capacidad de almacenamiento y el nivel de impacto del proyecto. Como la investigación no identifica una empresa ni un terreno específico, todavía no es posible establecer la compatibilidad urbanística, las distancias disponibles o la categoría ambiental definitiva.

Por esta razón, el dimensionamiento presentado constituye una propuesta preliminar de ingeniería. Antes de una ejecución real deberán verificarse la disponibilidad física del área, la clasificación del uso de suelo, los requisitos del GAD Manta, las condiciones de la autoridad ambiental y la aprobación de los organismos competentes en seguridad y prevención de incendios. Documentos municipales aplicables a implantaciones industriales contemplan diferentes formas de regularización ambiental según el nivel de impacto de la actividad.

En conjunto, el marco normativo permite establecer los criterios que deben considerarse para evaluar la propuesta, pero no autoriza a concluir anticipadamente que la reconversión cumple todas las obligaciones legales. La conformidad definitiva requiere un diseño particular, documentación técnica, permisos, inspecciones y mediciones realizadas sobre la instalación donde se implemente el sistema.

#### **1.2.3 Aplicación en el Contexto Ecuatoriano y Local (Manta)**

La evaluación de vectores energéticos alternativos para calderos industriales exige circunscribirse a la realidad macroeconómica y logística del país anfitrión, la factibilidad de la reconversión está supeditada a factores habilitantes como la madurez de la cadena de suministro, las unidades de comercialización vigentes, la infraestructura nacional de transporte, el marco tarifario y la volatilidad de los precios proyectada sobre el horizonte de inversión.

En el caso de Ecuador, la cadena de valor de los hidrocarburos integra producción nacional, cupos de importación, cabotaje, almacenamiento en terminales, transporte terrestre y comercialización final, no obstante, el diagnóstico energético de una planta no puede limitarse a constatar la disponibilidad física del recurso a nivel país; la existencia de infraestructura nacional (como gasoductos o poliductos) no garantiza simetría en el acceso, costos de flete, frecuencias de despacho o blindaje contractual para todas las empresas, por consiguiente, esta investigación emplea el entorno macroeconómico para mapear riesgos y oportunidades, pero condiciona la viabilidad estrictamente a las variables del modelo técnico y financiero desarrollado para el caso de estudio.

La ubicación geográfica del cantón Manta, inserta en el perfil costero de Manabí, constituye una externalidad positiva para la logística de hidrocarburos debido a su relativa proximidad a terminales marítimos y refinerías, sin embargo, variables micro logísticas como la distancia radial desde el centro de distribución, la tara de los autotanques (*cisternas*), la autonomía de la planta y el recargo por flete deben auditarse para cada instalación. En acatamiento al sigilo de la empresa atunera analizada, estas variables logísticas se asumen como factores preoperativos a validar, desestimándolas como ventajas intrínsecas o universales del proyecto.

#### **1.2.3.1 Estructura Energética del Ecuador**

Históricamente, la matriz energética ecuatoriana exhibe una fuerte dependencia hacia la extracción y refinación de crudo, concentrando el consumo final en el despacho eléctrico y la quema de derivados fósiles. En el sector industrial, la selección de la matriz térmica obedece a un equilibrio entre la demanda de entalpia del proceso, la base tecnológica instalada, la estructura de costos marginales y las regulaciones ambientales. En virtud de ello, carece de rigor académico generalizar que todo el aparato productivo nacional se mueve alrededor del Búnker C, omitiendo la segregación sectorial documentada en el Balance Energético Nacional.

El Fuel Oil No. 6 (Búnker C) es comercializado internamente por la Empresa Pública Petroecuador (EP Petroecuador) y figura también como un *commodity* en sus ventanas de

exportación, por el contrario, el abastecimiento nacional de GLP opera bajo un esquema mixto que acopla la refinación interna con la importación sostenida. La recepción del gas importado recae estratégicamente en el Terminal Marítimo Monteverde, interconectado mediante gasoducto con el Terminal El Chorrillo, por lo que, si bien esta megainfraestructura robustece la seguridad energética del país, la industria local mantiene su exposición a los precios de paridad de importación, interrupciones en la cadena de transporte terrestre y contingencias en la terminal.

El precio comercial de los combustibles no permite compararlos directamente. EP Petroecuador vende el Fuel Oil No. 6 industrial en dólares por galón, mientras que el GLP se comercializa en dólares por kilogramo. Para llevar ambos valores a una misma base se deben considerar la densidad, el poder calorífico y la eficiencia de la caldera. El resultado de esta conversión permite conocer cuánto cuesta la energía que realmente se transfiere al vapor.

Los precios industriales de estos combustibles pueden cambiar durante el periodo de evaluación debido a las condiciones del mercado y a la variación de los referentes internacionales. Por ello, el precio registrado en un solo mes no puede mantenerse como un valor constante durante los diez años del proyecto. En el análisis financiero se utilizará una tarifa base documentada y posteriormente se evaluarán posibles cambios mediante el análisis de sensibilidad.

**Tabla 2.** Variables del contexto energético ecuatoriano relevantes para la evaluación

| Variable                                  | Evidencia documental                                                                               | Aplicación en la investigación                                         |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>Comercialización de Fuel Oil No. 6</b> | EP Petroecuador publica precios industriales y reporta operaciones comerciales para este derivado. | Determinación del costo operativo de la línea base (Situación actual). |

|                                        |                                                                                           |                                                                                      |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Abastecimiento nacional de GLP</b>  | La cadena logística integra refinación nacional e importación, almacenamiento y despacho. | Tipificación y evaluación del riesgo operativo de suministro.                        |
| <b>Terminal Monteverde</b>             | Infraestructura costera para recepción y almacenamiento de gas importado.                 | Referencia macro logística nacional.                                                 |
| <b>Sistema Monteverde–El Chorrillo</b> | Gasoducto que habilita el transporte masivo hacia los centros de distribución primarios.  | No implica garantía contractual de abastecimiento ininterrumpido para la planta.     |
| <b>Unidad comercial del Búnker C</b>   | Facturación en USD/galón.                                                                 | Condiciona la conversión metrológica a costo por energía útil (\$/MMBtu o \$/GJ).    |
| <b>Unidad comercial del GLP</b>        | Facturación en USD/kg.                                                                    | Impide la contrastación lineal o directa frente al USD/galón del residual.           |
| <b>Volatilidad tarifaria</b>           | Emisión de boletines oficiales de precios con ajustes periódicos.                         | Obliga a la formulación de escenarios financieros mediante análisis de sensibilidad. |
| <b>Logística local (Última milla)</b>  | Impactada por distancia al terminal, capacidad de cisternas y tarifas de fleteros.        | Variable de riesgo que exige comprobación comercial empírica previa a la inversión.  |

*Nota. Elaboración propia a partir de boletines y memorias técnicas de EP Petroecuador. La tabla consolida los factores nacionales cualitativos y comerciales empleados para estructurar los supuestos del modelo, omitiendo proyecciones de volumen que no influyen en el balance térmico de la planta.*

#### **1.2.4 Transición energética en Ecuador**

La descarbonización paulatina del sector industrial ecuatoriano no se circunscribe a una única tecnología; abarca un portafolio de medidas orientadas a abatir el consumo específico de energía, mitigar la huella ambiental y desplazar equipos obsoletos. Estas estrategias transitan desde el ajuste estequiométrico de la combustión, la recuperación de calor (economizadores), el mantenimiento predictivo y la electrificación de cargas térmicas, hasta el salto cualitativo del cambio de matriz de combustibles, si bien la reconversión de Búnker C a GLP figura como una táctica atractiva dentro de este abanico, carece de fundamento científico postularla como la trayectoria definitiva o la panacea universal para todo el sector manufacturero nacional.

Técnicamente, el suministro de GLP en fase gaseosa otorga una gobernabilidad superior sobre la aerodinámica de la llama y la homogeneidad de la mezcla comburente. Bajo una correcta sintonización del quemador, esta propiedad viabiliza la operación con márgenes muy bajos de exceso de aire, elevando la eficiencia y suprimiendo la deposición de inquemados. No obstante, en el rigor de este trabajo, el porcentaje de exceso de aire asumido para el gas opera como un parámetro límite de modelación termodinámica, y de ninguna manera debe extrapolarse como el desempeño promedio de los calderos convertidos a nivel nacional.

La viabilidad de la conversión también depende de la infraestructura y del espacio disponible en la planta. El uso de GLP requiere almacenamiento a presión, vaporizadores, equipos de regulación y sistemas de detección de gas. En una instalación atunera que ya se encuentra construida, el área disponible puede ser insuficiente para respetar las distancias de seguridad del tanque. Por ello, el diseño preliminar deberá comprobarse con las dimensiones reales del terreno antes de continuar con la ingeniería de detalle.

La comparación financiera no debe limitarse al valor de las facturas de combustible. Para obtener un resultado equivalente se debe calcular el costo de la energía útil o el costo por tonelada de vapor producida. Como el Búnker C se vende por galón y el GLP por kilogramo, los precios deben convertirse considerando la densidad, el poder calorífico inferior y la eficiencia térmica de cada escenario.

Finalmente, aunque la macro infraestructura gasífera del Ecuador mitiga las fricciones logísticas a gran escala, no exime al proyecto de los riesgos inherentes al mercado internacional de importación de derivados, cuellos de botella en el transporte terrestre, oligopolios de comercializadoras locales y volatilidad de la tarifa industrial, por ende, la evaluación financiera debe modelarse invariablemente bajo escenarios de estrés, desestimando la falacia de un suministro "perpetuamente estable y barato".

**Tabla 3. Precios oficiales seleccionados de Fuel Oil No. 6 y GLP industrial**  
(Referencia temporal)

| <b>Periodo de vigencia tarifaria</b> | <b>Fuel Oil No. 6 industrial (USD)</b> | <b>Unidad</b> | <b>GLP industrial (USD)</b> | <b>Unidad</b> |
|--------------------------------------|----------------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|
| <b>12 dic. 2024–11 ene. 2025</b>     | 1,771411                               | Galón         | 0,934493                    | kg            |
| <b>12 may.–11 jun. 2025</b>          | 1,603839                               | Galón         | 0,921223                    | kg            |
| <b>12 oct.–11 nov. 2025</b>          | 1,692992                               | Galón         | 0,829096                    | kg            |
| <b>12 abril – 11 mayo de 2026</b>    | 2,407676                               | Galón         | 0,871296                    | kg            |
| <b>12 mayo – 11 junio de 2026</b>    | 2,371683                               | Galón         | 0,938916                    | kg            |

*Nota. Precios de venta en terminal publicados por EP Petroecuador para las comercializadoras calificadas y autorizadas a nivel nacional. Los valores corresponden a los períodos de vigencia indicados en cada fuente. El Fuel Oil No. 6 se expresa en USD/galón y el GLP industrial en USD/kg.*

## **1.2.5 Ecuaciones para la normalización económica de la energía útil**

Para evitar el sesgo analítico al comparar un fluido facturado por volumen contra uno facturado por masa, el estudio aplica la siguiente secuencia de normalización para determinar el costo por unidad de energía ingresada y, subsecuentemente, el costo por unidad de energía útil:

### **1.2.5.1 Costo de energía térmica de entrada (Fuel Oil No. 6):**

$$C_{FO6, energía} = \frac{P_{FO6, gal}}{E_{FO6, gal}}$$

Donde:

$C_{FO6, energía}$  = Costo de energía de entrada del Búnker C (USD/GJ o USD/MMBtu).

$P_{FO6, gal}$  = Precio de comercialización del Búnker C (USD/galón).

$E_{FO6, gal}$  = Contenido energético (Poder Calorífico Inferior volumétrico) del Búnker C por galón (GJ/galón o MMBtu/galón).

### **1.2.5.2 Costo de energía térmica de entrada (GLP):**

$$C_{GLP, energía} = \frac{P_{GLP, kg}}{PCI_{GLP, kg}}$$

Donde:

$C_{GLP, energía}$  = Costo de energía de entrada del GLP (USD/GJ o USD/MMBtu).

$P_{GLP, kg}$  = Precio de comercialización del GLP (USD/kg).

$PCI_{GLP, kg}$  = Poder Calorífico Inferior másico del GLP (GJ/kg o MMBtu/kg).

### **1.2.5.3 Costo de la energía útil transferida al vapor**

Una vez homologados los costos de entrada a una misma unidad energética (ej. USD/GJ), se aplica la eficiencia térmica del caldero ( $\eta$ ) bajo el escenario de cada combustible para obtener el costo real del calor aprovechado:

$$C_{\text{energía útil}} = \frac{C_{\text{energía de entrada}}}{\eta}$$

Una vez que los costos de ambos combustibles se expresan en la misma unidad energética, el valor de entrada se divide para la eficiencia térmica de la caldera. De esta manera se obtiene el costo de la energía que realmente aprovecha el vapor.

La comparación utilizada en el flujo de caja se expresará en USD/GJ de energía útil o en USD por tonelada de vapor producido.

#### **1.2.5.4 Conclusión del diagnóstico sectorial**

En Ecuador existen cadenas de abastecimiento para Búnker C y GLP, aunque cada combustible presenta condiciones diferentes de comercialización, transporte y almacenamiento. La infraestructura vinculada al Terminal Monteverde facilita la disponibilidad nacional de GLP, pero esto no asegura que su uso industrial sea rentable. Por esta razón, el estudio convierte los precios a una misma unidad de energía útil y analiza cómo sus variaciones afectan los resultados financieros del proyecto.

#### **1.2.5.5 Problemática Energética en una Empresa Manufacturera del Cantón Manta**

El cantón Manta consolida un enclave productivo estratégico ligado al procesamiento de recursos pesqueros y la manufactura de conservas, cuyo corazón de actividades demanda flujos ininterrumpidos de energía térmica para operaciones de cocción de la materia prima y esterilización de los envases (autoclaves), en tal sentido que la generación de vapor opera como un servicio auxiliar crítico que condiciona directamente la continuidad del esquema productivo.

La investigación toma como referencia una planta del sector atunero que cuenta con cinco calderas pirotubulares alimentadas con Búnker C y trabaja en dos turnos diarios de ocho horas. La identidad de la empresa se mantiene reservada por motivos de confidencialidad. Los datos operativos disponibles se presentan de manera agregada y los parámetros faltantes se completan con valores técnicos documentados para equipos de características similares.

Operativamente, la tracción del Búnker C somete a la planta a labores continuas de almacenamiento en tanques calentados, trasiego, adecuación térmica y atomización a presión, bajo regímenes donde la estequiometría de combustión, la presión de inyección o el mantenimiento acusan deficiencias, el sistema experimenta la precipitación de hollín sobre las áreas de transferencia de calor. En el escenario referencial, este desgaste se cuantifica en 80 horas-equipos mensuales adjudicadas a la remoción mecánica de incrustaciones, métrica que cuantifica la carga de mantenimiento, sin constituir estrictamente un paro absoluto de la línea productiva.

La línea base diagnostica un consumo agregado de 540 galones diarios de Búnker C y asume una eficiencia térmica de diseño del 74,5 %, de manera que la modelación de estos parámetros arroja una generación media de vapor inferior a la capacidad de placa teórica de la unidad equivalente (400 BHP). Esta divergencia no tipifica una falla mecánica; evidencia el comportamiento natural de los calderos industriales, los cuales modulan y operan a cargas parciales para emparejar la curva de demanda del proceso, no obstante, esta métrica resulta vital para indexar el combustible quemado frente a la energía útil entregada y los gastos operativos devengados.

La problemática de la planta trasciende el mero desempeño termodinámico. El Búnker C arrastra un fuerte componente de costos ocultos por acondicionamiento y mantenimiento correctivo, por el contrario, la transición hacia el GLP exige un fuerte desembolso de capital (CAPEX) para cristalizar el almacenamiento presurizado, el tren de vaporización, los lazos de regulación y las seguridades inherentes. Sumado a la asimetría en las unidades de facturación y a la volatilidad tarifaria de ambos hidrocarburos, resulta inviable pronosticar la conveniencia del proyecto basándose en intuiciones cualitativas.

El análisis busca determinar si las mejoras esperadas en la eficiencia y las emisiones compensarían el costo de la infraestructura, los nuevos riesgos operativos y la inversión total de la conversión a GLP. Los resultados corresponden a un caso referencial y no pueden aplicarse de manera directa a todas las empresas atuneras de Manta. Antes de ejecutar un

proyecto real será necesario actualizar los cálculos con el espacio disponible, las exigencias normativas y los precios acordados con los proveedores.

### **1.2.6 Bases Conceptuales del Estudio de Viabilidad**

La evaluación ingenieril de una reconversión tecnológica exige auditar si la nueva tecnología es capaz de operar bajo el régimen de diseño exigido, satisfacer los techos normativos ambientales y retornar dividendos económicos que superen el costo de oportunidad del capital, para estructurar este análisis sistemático, la investigación segrega la viabilidad del proyecto en tres dimensiones interdependientes pero evaluadas de forma aislada: técnica, económica y ambiental.

Esta taxonomía se enmarca en la estructura clásica de formulación y evaluación de proyectos de inversión en ingeniería industrial, no obedece textualmente a una guía singular de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), constituyendo un estándar metodológico universalmente aceptado en el ámbito corporativo.

#### **1.2.6.1 Viabilidad técnica**

La viabilidad técnica valida la capacidad de la ingeniería proyectada para cubrir la demanda térmica (másica y entalpía) de la línea base, respetando los protocolos de operación continua y seguridad industrial, por lo que el escrutinio técnico demanda el dimensionamiento de las siguientes variables:

- La energía útil que el proceso necesita.
- Producción de vapor obtenida por unidad de combustible.
- Consumo promedio y máximo de GLP.
- Capacidad requerida para la vaporización.
- Volumen necesario para almacenar el combustible.
- Presión y características del sistema de regulación.
- Compatibilidad entre el GLP y el quemador.
- Espacio disponible para distribuir los equipos.
- Dispositivos de cierre de emergencia y protección instrumentada.

La propuesta será técnicamente factible si los equipos seleccionados pueden cubrir la demanda térmica y no se identifican restricciones que impidan su funcionamiento. Este resultado tendrá un alcance preliminar, porque la investigación desarrolla una ingeniería conceptual y no incluye planos definitivos, análisis HAZOP ni permisos para construir la instalación.

El marco referencial acude a la norma NFPA 85 para los preceptos de seguridad funcional en las cámaras de combustión, y a la NFPA 58 y la norma INEN aplicable para orientar el arreglo del sistema gasífero, estas citas bibliográficas fundamentan el prediseño, pero no reemplazan el visado estructural de la ingeniería definitiva.

#### **1.2.6.2 Viabilidad económica**

La viabilidad económica audita la fortaleza del proyecto para generar flujos de caja incrementales que retribuyan la inversión inicial y cubran los márgenes de riesgo a lo largo de su ciclo de vida, por lo cual, manteniendo constante la entrega de energía útil, el modelo financiero pondera:

Gastos de capital, también conocidos como inversión inicial (CAPEX). Además de la inversión inicial, el cálculo financiero considera el precio de los combustibles expresado en USD/GJ, la electricidad consumida por el vaporizador, el mantenimiento y las inspecciones obligatorias. También se incluyen los gastos que podrían evitarse con la conversión, el posible valor residual de los equipos y los cambios esperados en los precios. Los flujos obtenidos se actualizarán mediante la TMAR definida para el proyecto.

Los criterios de sanción financiera exigen estrictamente:

$$VAN > 0$$

$$TIR > TMAR$$

Adicionalmente, se requiere que el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) no exceda el horizonte temporal de evaluación del proyecto.

Si el flujo de efectivo descontado resulta negativo o no amortiza el capital invertido, el proyecto se declara económicamente inviable bajo el escenario tarifario modelado, aunque un Valor Actual Neto negativo no invalida el rigor del balance térmico, puesto que su valor

analítico reside en detectar los puntos de quiebre (sensibilidad) tarifarios necesarios para que el proyecto mute a una zona de rentabilidad.

### **1.2.6.3 Viabilidad ambiental**

La viabilidad ambiental se analizará comparando las emisiones de ambos combustibles bajo la misma demanda térmica. El objetivo es conocer si la conversión redujera el impacto de la operación sin generar condiciones contrarias a la normativa aplicable:

- Variación estimada de las emisiones directas de dióxido de carbono.
- Reducción esperada de los óxidos de azufre según la composición de cada combustible.
- Disminución prevista en la producción de material particulado primario (PM).
- Comportamiento aerotérmico del óxido de nitrógeno (NOx) y el monóxido de carbono (CO).
- Comparativa teórica en relación con los Límites Máximos Permitidos (LMP) establecidos por la normativa pertinente para fuentes fijas.
- Protocolo de seguimiento isocinético que es necesario después de la reconversión.

El dictamen ambiental se considera positivo si el nuevo hidrocarburo arroja una menor intensidad de emisiones para la misma carga térmica, sin perfilar barreras técnicas que amenacen el cumplimiento de la normativa, reiterándose que esta simulación termoquímica no suplanta las obligaciones de monitoreo de emisiones en la chimenea, ni exime a la planta de tramitar las licencias operativas correspondientes, toda vez que el cálculo de la huella de CO<sub>2</sub> se constriñe a las emisiones de "Alcance 1" (directas por quema de combustible) del caldero, eludiendo inventarios organizacionales completos.

### **1.2.6.4 Integración de las dimensiones**

La matriz de viabilidad integral asume la premisa de que los tres vectores analizados carecen de codependencia en sus resultados finales, una propuesta de ingeniería puede despuntar como técnicamente factible y ecológicamente impecable, naufragando simultáneamente en la evaluación financiera debido a condiciones tarifarias adversas. Frente a esta realidad, las conclusiones de la tesis se desagregarán por dimensión, clarificando los

puntos críticos (tarifas, impuestos, eficiencias) requeridos para revertir los indicadores deficientes.

El escenario modelado en esta tesis puede cristalizar una robusta factibilidad técnica y una innegable solvencia ambiental, dejando la dimensión financiera a merced del cruce entre el CAPEX de reconversión, los precios de mercado del gas y los ahorros empíricos demostrables, esta segmentación previene la emisión falaz de un "aprobado general" cuando alguna de las aristas rectoras del proyecto no supera los criterios de aceptación industrial.

**Tabla 4.** *Criterios multicriterio utilizados para la evaluación integral de viabilidad del proyecto*

| <b>Dimensión</b> | <b>Indicadores principales de evaluación</b>                                                                                                     | <b>Criterio de aceptación técnica/financiera</b>                                                                                 | <b>Alcance del dictamen</b>                                                  |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Técnica</b>   | Demanda másica de vapor, flujo de GLP requerido, capacidad de vaporización, dimensionamiento de almacenamiento y anillos de seguridad funcional. | Capacidad nominal holgada y ausencia de incompatibilidades o cuellos de botella teóricos evidentes en la topología de la planta. | Evaluación de ingeniería conceptual preliminar (Pre-FEED).                   |
| <b>Económica</b> | Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR), Tasa Mínima Aceptable de                                                                 | $VAN > 0$ , $TIR > TMAR$ , y recuperación del capital estrictamente dentro                                                       | Fuertemente dependiente de la estructura tarifaria de los hidrocarburos y de |

|                  |                                                                                                                                                      |                                                                                                                                       |                                                                                                              |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | Rendimiento (TMAR)<br>y Periodo de<br>Recuperación de la<br>Inversión (PRI).                                                                         | del horizonte temporal<br>del flujo de caja.                                                                                          | la documentación<br>de costos<br>evitados.                                                                   |
| <b>Ambiental</b> | Mitigación proyectada<br>de CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , material<br>particulado (PM), NOx<br>y comparativa teórica<br>frente al marco legal. | Contracción global de<br>emisiones para igual<br>energía térmica útil y<br>cumplimiento teórico<br>de Límites Máximos<br>Permisibles. | Requiere auditoría<br>isocinética de<br>validación<br>posterior a la<br>eventual ejecución<br>física.        |
| <b>Integral</b>  | Ponderación holística<br>y estructurada de las<br>tres dimensiones<br>rectoras.                                                                      | Conclusión y<br>dictamen diferenciado<br>por vector, sin admitir<br>"promedios" que<br>enmascaren<br>inviabilidades<br>puntuales.     | Exclusivamente<br>referencial; no<br>sustituye la toma<br>de decisión<br>ejecutiva de la<br>Junta Directiva. |

*Nota. El cuadro de criterios aplica estrictamente al escenario referencial y termodinámico estructurado en el documento, la eventual maduración del proyecto hacia su fase ejecutiva demanda estudios de ingeniería de detalle (planos As-Built, HAZOP) y validaciones de mercado particulares para la planta receptora.*

### 1.3 Marco Conceptual

El marco conceptual agrupa y homologa la terminología técnica empleada para caracterizar la línea base, modelar el escenario proyectado con GLP e interpretar los indicadores de viabilidad. Las definiciones se estructuran desde una perspectiva operativa, ciñéndose rigurosamente al alcance metodológico del estudio, en los casos donde un

parámetro omita datos empíricos de planta, se declarará formalmente como un valor constante de literatura técnica o un supuesto documentado de modelación.

### 1.3.1 Sistemas de Generación de Vapor y Transferencia de Calor

**Caldero industrial:** Equipo de intercambio térmico diseñado para transferir la energía liberada por un combustible hacia un fluido de trabajo (agua), produciendo vapor bajo condiciones controladas de presión y temperatura. En los calderos pirotubulares, los gases producto de la combustión atraviesan un haz tubular sumergido, cediendo su entalpía predominantemente por radiación y convección hacia la pared de los tubos, y finalmente por conducción hacia la masa de agua.

**Caldero pirotubular:** El generador de vapor tiene una variante constructiva en la que los gases calientes fluyen por dentro de los tubos y el líquido que se calienta lo envuelve desde afuera, debido a su inercia térmica y la facilidad para mantenerla, es la configuración predominante en aplicaciones de manufactura que contienen presión y flujos máxicos moderados.

**Capacidad nominal:** Tasa másica máxima de producción de vapor continuo que el equipo garantiza bajo los parámetros de diseño del fabricante, para el presente modelo analítico, se adopta un sistema equivalente a 400 BHP, lo que confiere una capacidad nominal de placa aproximada de 13.800 lb/h de vapor. Esta magnitud representa un límite superior y no refleja la media operativa de la jornada.

**Boiler Horsepower (BHP):** Unidad convencional de potencia térmica en la ingeniería de vapor norteamericana. Para convertir esta unidad en capacidad de producción de vapor se utiliza la relación de 1 BHP = 34,5 lb/h, definida para la evaporación del agua desde y hasta 212 °F.

$$1 \text{ BHP} = 34,5 \text{ lb/h de vapor}$$

*(Referida a la evaporación desde y a 212 °F).*

**Producción promedio de vapor:** Cantidad media de vapor producida durante las horas analizadas, expresada en lb/h. Este valor puede ser menor que la capacidad nominal

porque depende del consumo de combustible, la demanda del proceso y la eficiencia alcanzada durante la operación.

**Factor de carga (FC):** Relación entre la producción promedio de vapor y la capacidad nominal de la caldera. El resultado indica qué porcentaje de la capacidad instalada se utiliza durante la operación.

$$FC = \left( \frac{\text{Carga promedio}}{\text{Capacidad nominal}} \right) \times 100$$

Un factor de carga bajo no indica necesariamente una falla del equipo, ya que la producción de vapor puede variar según las necesidades del proceso.

**Energía útil:** Cantidad de calor que recibe el agua para aumentar su temperatura y convertirse en vapor. Se calcula a partir del flujo másico producido y de la diferencia entre la entalpía del vapor y la entalpía del agua de alimentación.

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \dot{m}_v (h_v - h_{aa})$$

Donde:  $\dot{m}_v$  es el flujo másico de vapor,  $h_v$  la entalpía específica del vapor, y  $h_{aa}$  la entalpía específica del agua de alimentación.

**Eficiencia térmica global del caldero ( $\eta_t$ ):** Porcentaje de la energía aportada por el combustible que finalmente se transfiere al vapor. Puede calcularse mediante el método directo, comparando la energía de entrada y salida, o mediante el método indirecto, que determina las pérdidas presentes en el sistema.

$$\eta_t = \left( \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\dot{Q}_{\text{combustible}}} \right) \times 100$$

Se calcula de forma empírica midiendo los flujos (método directo) o desagregando las pérdidas térmicas contabilizadas (método indirecto o de balance de pérdidas).

**Eficiencia de combustión:** Indica qué tan bien el quemador transforma la energía química del combustible en calor. Su cálculo considera las pérdidas asociadas con los gases

de escape y el combustible que no se quema completamente. No equivale a la eficiencia global de la caldera, porque no incluye las pérdidas por radiación, convección externa o purgas.

**Transferencia de calor:** Sistemas termodinámicos combinados que permiten el paso de energía desde la región de reacción hasta el fluido de trabajo. Engloba la radiación concentrada en el hogar, la convección forzada en los tramos tubulares y la conducción térmica a través de los espesores metálicos.

**Ensuciamiento térmico (*Fouling*):** Precipitación y adhesión de componentes inquemados y cenizas inorgánicas sobre el lado gas de las superficies de intercambio térmico, esta costra eleva exponencialmente la resistencia térmica por conducción, mermando el calor transferido, elevando la temperatura de chimenea (pérdidas secas) y precipitando el mantenimiento correctivo.

### 1.3.2 Dinámica de los Combustibles y la Combustión

**Fuel Oil No. 6 (Búnker C):** Hidrocarburo líquido de carácter residual, constituido por las fracciones más pesadas y densas del tren de refinación. Se comercializa con una elevada viscosidad cinemática, requiriendo un acondicionamiento térmico ineludible previo a su inyección. Al carecer de una fórmula química universal, sus parámetros reológicos y térmicos deben extraerse de certificados de calidad o tipificarse mediante constantes de investigación documental.

**Gas Licuado de Petróleo (GLP):** Fluido derivado del gas natural o refinería, compuesto mayoritariamente por propano ( $C_3H_8$ ) y butano ( $C_4H_{10}$ ), se despacha y almacena en estado líquido bajo compresión isoterma y se dosifica en el quemador en fase gaseosa.

**Poder Calorífico Superior (PCS):** Entalpía total de la combustión que se libera cuando el agua generada en los productos de reacción se condensa y deja recuperar el calor latente de vaporización.

**Poder Calorífico Inferior (PCI):** Calor liberado asumiendo que la fracción de agua formada en la combustión abandona la chimenea en fase vapor, debido a que las chimeneas

industriales operan por encima del punto de rocío, la presente investigación adopta el PCI como unidad base de todos los balances de energía.

**Combustión estequiométrica:** Modelo teórico idealizado en el que se introduce la cantidad precisa de oxígeno necesaria para oxidar completamente el carbono y el hidrógeno del hidrocarburo, generando un gas de escape sin ninguna huella de oxígeno residual ni sustancias reactivas no quemadas.

**Aire teórico:** Masa calculada de aire atmosférico necesaria para satisfacer el balance estequiométrico del combustible.

**Exceso de aire (EA):** Porcentaje adicional de aire comburente suministrado por sobre el límite teórico para garantizar el encuentro molecular y la combustión completa:

$$EA = \left( \frac{\text{Aire}_{\text{real}} - \text{Aire}_{\text{teórico}}}{\text{Aire}_{\text{teórico}}} \right) \times 100$$

Un *EA* subóptimo detona inquemados (CO y hollín), un *EA* excesivo actúa como lastre térmico, robando calor sensible y elevando las pérdidas por chimenea.

**Relación aire-combustible (AFR):** Razón de mezcla entre las tasas másicas o volumétricas del aire frente al hidrocarburo, la cual gobierna la temperatura de la llama, la eficiencia global y el perfil de contaminantes atmosféricos.

**Atomización:** Degradación mecánica de un fluido pesado (como el Búnker) en microgotas, maximizando el área superficial específica para acelerar su contacto con el aire comburente y facilitar la ignición.

**Vaporización del GLP:** Transición de fase controlada (absorción de calor latente) previa a la entrada al quemador, en aplicaciones de alto consumo como calderos, la vaporización natural del tanque es insuficiente, requiriendo equipos vaporizadores mecánicos alimentados por electricidad o vapor.

**Flujo promedio y máximo de GLP:** Consumo másico integral sobre la jornada laboral que sirve para dimensionar el OPEX, su pico instantáneo o flujo máximo dictamina las

especificaciones técnicas obligatorias para el tamaño del vaporizador, sección de tuberías y válvulas de alivio.

**Reconversión tecnológica (*Retrofitting*):** Modernización y adecuación de activos industriales operativos para transitar hacia un nuevo estándar energético o tecnológico, en el caso de estudio, engloba el reemplazo del cabezal de combustión y el despliegue íntegro de la infraestructura receptora de GLP.

### 1.3.3 Parámetros Ambientales y de Sostenibilidad

**Emisión atmosférica:** Descarga de fluidos o partículas de desecho generadas por la combustión hacia la tropósfera a través del ducto de escape.

**Concentración de emisión:** Cuantificación másica de un contaminante por unidad de volumen de gas efluente ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ), rigurosamente ajustada a temperatura, presión y porcentaje de  $\text{O}_2$  de referencia dictados por la normativa.

**Factor de emisión:** Valor estandarizado (Ej.: guías EPA/IPCC) que estima la tasa de contaminante emitida por unidad funcional de combustible o energía ( $\text{kg}/\text{TJ}$  o  $\text{lb}/\text{MMBtu}$ ), posee naturaleza teórica y nunca suple el rigor de una medición analítica de campo.

**Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ):** Efluente directo y predecible de la oxidación de los átomos de carbono; principal vector de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) de alcance 1 en operaciones térmicas.

**Dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ):** Óxido ácido corrosivo y contaminante resultante de la combustión de la carga de azufre inherente al Búnker C.

**Material particulado (PM):** Aerosoles de fracción sólida o líquida. En combustibles pesados resulta de cenizas no orgánicas arrastradas y agregados de asfáltenos no oxidados (hollín).

**Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ):** Familia de gases reactivos formados por el nitrógeno del hidrocarburo (*fuel NO<sub>x</sub>*) o por la fijación del nitrógeno atmosférico (*thermal NO<sub>x</sub>*) bajo el rigor de altas temperaturas en el hogar.

**Monóxido de carbono (CO):** Trazador de combustión incompleta provocado por mezcla deficiente (falla de turbulencia), enfriamiento prematuro de llama (falla de temperatura) o corto tiempo de residencia.

**Emisiones directas:** Inventario ambiental derivado intrínsecamente del proceso de combustión perimetral de la planta, el cual excluye cálculos del ciclo de vida del hidrocarburo o estimaciones corporativas de huella de carbono.

**Cumplimiento ambiental potencial:** Dictamen teórico producto de contrastar la simulación frente a los Límites Máximos Permisibles, por lo cual no acredita conformidad regulatoria, reservando esta competencia para la entidad gubernamental pertinente previa auditoría de campo.

**Combustible de transición:** Hidrocarburo que se adopta durante un periodo de tiempo porque tiene menores externalidades operativas o factores de emisión más bajos que el agente saliente (Búnker), aunque no pone fin a la dependencia de los combustibles fósiles ni asegura una matriz con cero emisiones netas.

### 1.3.4 Evaluación de Proyectos de Ingeniería

**Inversión inicial (CAPEX):** *Capital Expenditure*. Sanción de recursos inyectados al "Año 0" para viabilizar el proyecto. Contempla bienes de capital (tanques, vaporizadores, quemadores), obras civiles mecánicas, *skids* de regulación y comisionamiento.

**Costo operativo (OPEX):** *Operational Expenditure*, flujo de capital periódico asignado para sostener la marcha del proyecto: abasto de gas, energía del vaporizador, cuotas de mantenimiento y pago de pólizas o inspecciones obligatorias.

**Flujo de caja incremental:** Serie financiera computada al restar del escenario propuesto (GLP) los flujos correspondientes al escenario inercial (Búnker C), con el propósito de aislar y evaluar exclusivamente los méritos e impactos atribuibles a la reconversión:

$$FCE_t = \text{Beneficios}_t - \text{Costos}_t$$

**Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (TMAR):** El costo de oportunidad del capital y el límite crítico de requerimiento financiero que la empresa establece antes de asignar capital propio o apalancado al proyecto.

**Valor Actual Neto (VAN):** Diferencial obtenido al descontar los flujos netos proyectados al tiempo cero frente a la inversión inicial, utilizando la TMAR como factor de descuento:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FCE_t}{(1+i)^t}$$

Un dictamen de  $VAN > 0$  rubrica la viabilidad económica bajo el horizonte estudiado; un VAN negativo rechaza la propuesta de valor sin refutar la calidad de la ingeniería térmica.

**Tasa Interna de Retorno (TIR):** Rendimiento intrínseco porcentual del flujo de caja (la tasa  $i$  que vuelve el  $VAN = 0$ ), sanciona viabilidad cuando supera numéricamente a la TMAR.

**Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI):** Línea de tiempo cronológica (*payback*) requerida para que la sumatoria de ahorros operativos y utilidades incrementales igualen el CAPEX desembolsado.

**Evaluación financiera incremental con enfoque de ciclo de vida:** Delimitación formal asumida para esta investigación frente al *LCC (Life Cycle Costing)* tradicional, debido a que no abarca costos de disposición final ni una arquitectura total del ciclo de producto.

**Análisis de sensibilidad:** Prueba de estrés aplicada a la matriz de evaluación financiera, perturbando variables endógenas y exógenas (eficiencia, CAPEX, costo del USD/kg de GLP) para observar la resiliencia o colapso de indicadores críticos como el VAN.

## 1.4 Marco Legal y Ambiental

La viabilidad del proyecto de sustitución de combustibles en el sector industrial de Manta no solo obedece a criterios técnicos y económicos, sino que se fundamenta en un robusto andamiaje jurídico que jerarquiza la protección ambiental y la eficiencia energética como políticas de Estado, cuyo análisis de la normativa ecuatoriana vigente, estructurado

bajo el principio de supremacía constitucional, evidencia que la transición hacia fuentes de energía más limpias, como el Gas Licuado de Petróleo (GLP), constituye un mecanismo de cumplimiento legal obligatorio para mitigar pasivos ambientales.

En la cúspide del ordenamiento jurídico, la Asamblea Constituyente del Ecuador (2008) establece un mandato ecológico transversal a través de su Artículo 14, el cual reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, declarando a su vez de interés público la prevención del daño ambiental y la recuperación de espacios naturales degradados. Este precepto se conecta directamente con el Artículo 413, el cual dispone que el Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas y de bajo impacto, por consiguiente, la migración industrial de combustibles residuales pesados hacia opciones gaseosas de menor huella de carbono no es opcional, sino que responde a una directriz constitucional de promoción de tecnologías limpias para garantizar el Sumak Kawsay o Buen Vivir.

En el nivel de las leyes orgánicas, el Código Orgánico del Ambiente (COA), vigente desde 2017, instituye en su Artículo 9 el principio de "Quien Contamina Paga", obligando a los operadores de actividades productivas a internalizar los costos ambientales derivados de sus emisiones, al tiempo que el Artículo 226 del mismo cuerpo legal regula específicamente las emisiones a la atmósfera desde fuentes fijas de combustión, determinando que estas deben someterse a límites técnicos estrictos para asegurar la calidad del aire. Complementariamente, la Ley Orgánica de Eficiencia Energética (2019), en su Artículo 3, declara de interés nacional el uso eficiente, racional y sostenible de la energía, esta ley crea el marco habilitante para que las industrias implementen planes de mejora del desempeño energético, identificando a la sustitución de equipos y combustibles obsoletos (como las calderas a búnker) como una acción prioritaria para reducir la intensidad energética del sector productivo nacional.

La operatividad técnica de estas disposiciones se materializa en la normativa secundaria, cuyo instrumento central es el Texto Unificado de Legislación Secundaria del

Medio Ambiente (TULSMA), específicamente mediante el Acuerdo Ministerial 097-A que reforma el Libro VI del TULSMA y establece en su Anexo 3 la "Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas de Combustión". Este reglamento técnico define los Límites Máximos Permisibles para contaminantes criterio como material particulado, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre. La normativa discrimina los estándares en función del tipo de combustible; al utilizar búnker, las industrias se enfrentan a la complejidad técnica de abatir contaminantes como el azufre y las cenizas para cumplir con la norma, en contraste, el uso de GLP facilita el cumplimiento normativo directo debido a su combustión limpia, eliminando el riesgo de sanciones administrativas y garantizando la renovación de la Licencia Ambiental.

Finalmente, en el ámbito de la seguridad industrial y la regulación local, la implementación de sistemas de GLP debe regirse por la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2261, la cual adopta estándares internacionales para el almacenamiento, manejo y distribución de gas licuado de petróleo, asegurando la integridad de las instalaciones, en sintonía con el nivel territorial donde la Ordenanza que Regula la Gestión Ambiental en el Cantón Manta (2021) ejerce la competencia exclusiva del Gobierno Autónomo Descentralizado para controlar la contaminación en su jurisdicción. Esta norma local obliga a las industrias asentadas en el perímetro urbano e industrial de la ciudad a implementar mejores tecnologías disponibles para mitigar olores, humos y ruidos, convirtiendo a la sustitución del búnker fuente principal de estas molestias en una medida de cumplimiento mandatorio para mantener la armonía con el entorno urbano y evitar la clausura de operaciones.

## **1.5 Hipótesis y Variables**

La presente investigación analiza la reconversión de Búnker C a GLP mediante la contrastación de una línea base frente a un escenario termodinámico y financiero proyectado. En concordancia con el diseño no experimental del estudio, la variable referida al tipo de hidrocarburo no sufre una manipulación física o de campo; por el contrario, se parametriza a través de las propiedades fisicoquímicas y operativas que rigen el modelamiento de cada

escenario. Consecuentemente, las variables de estudio se operacionalizan mediante indicadores técnicos, ambientales y económicos, los cuales estructuran la matriz de evaluación de viabilidad.

### 1.5.1 Hipótesis

#### **Hipótesis de investigación ( $H_1$ )**

La sustitución proyectada de Búnker C por Gas Licuado de Petróleo (GLP) en el parque de calderos pirotubulares del caso referencial optimiza favorablemente el desempeño energético y el perfil ambiental del sistema; sin embargo, su viabilidad económica integral está condicionada a que los ahorros operativos marginales logren amortizar el gasto de capital (CAPEX) y la variación incremental en el costo directo del combustible a lo largo del horizonte financiero del proyecto.

#### **Hipótesis nula ( $H_0$ )**

La sustitución proyectada de Búnker C por Gas Licuado de Petróleo (GLP) en los calderos pirotubulares no genera mejoras técnicas ni ambientales significativas, y no produce retornos económicos incrementales que justifiquen la rentabilidad de la inversión requerida bajo las condiciones del escenario evaluado.

#### **Criterios de contrastación y decisión**

Para dotar de rigor estadístico y analítico al dictamen, la hipótesis de investigación ( $H_1$ ) se evaluará de forma segmentada a través de sus tres dimensiones rectoras:

- **Dimensión Técnica:** Obtendrá dictamen favorable si la ingeniería proyectada garantiza el suministro de la demanda térmica (energía útil) de referencia, y si el dimensionamiento de los equipos periféricos y de seguridad exhibe capacidad nominal holgada.
- **Dimensión Ambiental:** Obtendrá dictamen favorable si la cuantificación estequiométrica y los factores de emisión proyectan una contracción en la huella de contaminantes respecto a la línea base, evaluados bajo la misma carga térmica útil.
- **Dimensión Económica:** Obtendrá dictamen favorable (viable) exclusivamente si se cumplen de forma simultánea los postulados matemáticos de rentabilidad:  $VAN > 0$ ,

$TIR > TMAR$ , y si el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) se enmarca en el horizonte temporal del estudio (10 años).

Bajo este esquema de decisión matricial, la hipótesis de investigación no se limita a un criterio binario (aceptación/rechazo total). Podrá ser aceptada parcialmente si los ejes técnico y ambiental resultan favorables, pero el eje financiero no supera las pruebas de estrés en el escenario tarifario base.

### **1.5.2 Identificación de las Variables**

#### **Variable Independiente**

Matriz energética o tipo de hidrocarburo asignado al escenario de operación: Búnker C para la modelación de la línea base y GLP para la simulación del escenario de reconversión, al tratarse de un estudio de caso documental, la variable se clasifica en una escala nominal de dos categorías mutuamente excluyentes (Categoría 1: Búnker C; Categoría 2: GLP), sin que medie manipulación experimental *in situ*.

#### **Variable Dependiente**

Viabilidad integral de la sustitución energética. Esta variable macro capacidad se desagrega y cuantifica operativamente a través de tres subdimensiones analíticas:

- Viabilidad técnica termodinámica.
- Viabilidad ambiental y regulatoria.
- Viabilidad económica y financiera.

*(Nota: Aunque el concepto de "optimización" es subyacente al propósito del estudio, se descarta como nombre principal de la variable dependiente al no constituir una magnitud dimensional escalar única).*

#### **Variables de control (Parámetros fijos del modelo)**

Para garantizar el principio *ceteris paribus* (aislar el efecto exclusivo del cambio de combustible) y asegurar que el balance de materia y energía sea matemáticamente coherente, el modelo asume como constantes o variables de control los siguientes parámetros operativos de planta:

- Régimen de operación: 16 horas de marcha continua diaria.

- Frecuencia productiva: 300 días calendario al año.
- Demanda entalpía: Misma tasa de energía útil entregada al fluido de trabajo en ambos escenarios.
- Condiciones del vapor: Presión de saturación constante.
- Termodinámica de ingreso: Temperatura del agua de alimentación constante.
- Evaluación de capital: Horizonte financiero proyectado a 10 años.
- Costo de oportunidad: TMAR establecida en 12 % (sujeta a justificación del costo de capital promedio ponderado de la industria).

### 1.5.3 Operacionalización de las Variables

#### 1.5.3.1 Operacionalización de la Variable Independiente

**Tabla 5. Matriz de Operacionalización: Variable Independiente**

| Variable                                 | Dimensión / Eje                     | Indicador de Medición              | Unidad / Categoría | Escala Estadística | Procedencia de Datos                                   |
|------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Tipo de combustible del escenario</b> | Identificación del combustible      | Matriz utilizada en la modelación. | Búnker C / GLP     | Nominal            | Definición cualitativa del escenario base/proposición. |
|                                          |                                     |                                    |                    |                    | Fichas técnicas, referencias estandarizadas (IPCC).    |
|                                          | Propiedades termodinámicas          | Poder Calorífico Inferior (PCI).   | MJ/kg              | Razón              |                                                        |
|                                          |                                     |                                    |                    |                    | Certificado de calidad del proveedor /                 |
|                                          | Propiedades físicas y de transporte | Gravedad específica o densidad a   | kg/L               | Razón              |                                                        |

|                                       |                                                          |                                    |           |                                                                  |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------|
|                                       | temperatura de referencia.                               |                                    |           | manual técnico.                                                  |
| Composición elemental                 | Concentración másica de Azufre (S).                      | % masa o mg/kg                     | Razón     | Especificación técnica o base documental del lote.               |
| Acondicionamiento fluídico (Líquidos) | Temperatura de consigna para precalentamiento.           | °C                                 | Intervalo | Parámetro documental de la curva reológica del Búnker C.         |
| Suministro al cabezal de combustión   | Estado o fase termodinámica de inyección en la boquilla. | Líquido atomizado o / Fase gaseosa | Nominal   | Característica tecnológica intrínseca al sistema.                |
| Estequiometría operativa              | Porcentaje de Exceso de Aire (EA) ajustado.              | %                                  | Razón     | Dato agregado de planta o supuesto estandarizado del fabricante. |
| Red de abastecimiento                 | Presión de suministro en el tren de regulación.          | bar                                | Razón     | Parámetro de diseño mecánico e ingeniería básica.                |

|                           |                                    |           |         |                                                   |
|---------------------------|------------------------------------|-----------|---------|---------------------------------------------------|
| Requerimiento tecnológico | Tipo y configuración del quemador. | Líquidos  | Nominal | Especificación técnica del fabricante del equipo. |
|                           |                                    | pesados   |         |                                                   |
|                           |                                    | / GLP     |         |                                                   |
|                           |                                    | exclusivo |         |                                                   |
|                           |                                    | / Dual    |         |                                                   |
|                           |                                    | gas-      |         |                                                   |
|                           |                                    | líquido   |         |                                                   |

*Nota. La viscosidad cinemática, por su naturaleza, se empleará exclusivamente como parámetro de caracterización y dimensionamiento del Búnker C (condicionando el bombeo y atomización), absteniéndose de utilizarse como indicador equivalente para el escenario de GLP en fase gaseosa.*

### 1.5.3.2 Operacionalización de la Variable Dependiente

**Tabla 6.** Matriz de Operacionalización: Variable Dependiente

| Variable                                  | Dimensión / Eje | Indicador de Medición                               | Unidad / Categoría      | Escala Estadística | Procedencia de Datos                                 |
|-------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Viabilidad integral de sustitución</b> | Técnica         | Eficiencia térmica global del caldero ( $\eta_t$ ). | %                       | Razón              | Cálculo termodinámico (Método Indirecto ASME PTC 4). |
|                                           |                 | Tasa promedio de producción de vapor.               | lb/h o kg/h             | Razón              | Cálculo a partir del requerimiento entálpico y PCI.  |
|                                           |                 | Consumo específico de combustible.                  | kg combust. / ton vapor | Razón              | Cálculo directo del balance de materia.              |

|           |                                                                         |                           |           |                                                          |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|----------------------------------------------------------|
|           | Temperatura de los gases de combustión por chimenea.                    | °C                        | Intervalo | Dato agregado empírico o supuesto de eficiencia térmica. |
|           | Horas-equipos mensuales dedicadas al mantenimiento correctivo (hollín). | h-equipos / mes           | Razón     | Registro agregado provisto por el área de mantenimiento. |
|           | Flujo másico promedio y máximo del gas.                                 | kg/h                      | Razón     | Cálculo derivado del balance térmico de máxima demanda.  |
|           | Volumen nominal del recipiente a presión (Capacidad de almacenamiento). | Galones (us-gal) o m³     | Razón     | Dimensionamiento o ingeniería según consumo y autonomía. |
| Ambiental | Emisiones directas de CO <sub>2</sub> (alcance 1).                      | ton CO <sub>2</sub> / año | Razón     | Estimación teórica (Factores de emisión IPCC).           |

|  |                                                                                    |                                               |         |                                                                          |
|--|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------|
|  | Concentración /<br>carga de emisión<br>de Dióxido de<br>Azufre (SO <sub>2</sub> ). | mg/Nm <sup>3</sup> o<br>kg/año                | Razón   | Estimación<br>teórica basada en<br>balance<br>elemental de<br>azufre.    |
|  | Carga de<br>emisión de<br>Material<br>Particulado<br>Primario (PM).                | mg/Nm <sup>3</sup> o<br>kg/año                | Razón   | Estimación<br>documental EPA<br>(AP-42) o<br>literatura afín.            |
|  | Concentración<br>volumétrica de<br>Óxidos de<br>Nitrógeno (NO <sub>x</sub> ).      | mg/Nm <sup>3</sup>                            | Razón   | Dato de catálogo<br>del quemador o<br>estimación<br>teórica.             |
|  | Cumplimiento<br>ambiental<br>potencial frente<br>al TULSMA o<br>normativa afín.    | Cumple /<br>No<br>cumple /<br>No<br>evaluable | Nominal | Contraste<br>comparativo<br>teórico vs.<br>normativa<br>vigente.         |
|  | Desembolso o<br>Inversión inicial<br>(CAPEX).                                      | USD                                           | Razón   | Cotizaciones<br>comerciales y<br>presupuestos<br>referenciales.          |
|  | Gasto Anual<br>Operativo por<br>Combustible.                                       | USD /<br>año                                  | Razón   | Cálculo del<br>consumo másico<br>anual por tarifa<br>industrial (\$/kg). |

|                 |       |            |                    |
|-----------------|-------|------------|--------------------|
| Flujo de Caja   |       |            |                    |
| Incremental     |       |            |                    |
| (ahorros        | USD / |            | Evaluación         |
| marginales      | año   | Razón      | contable y cálculo |
| menos nuevos    |       |            | operativo anual.   |
| gastos).        |       |            |                    |
| Valor Actual    | USD   | Intervalo* | Modelo de          |
| Neto (VAN).     |       |            | cálculo financiero |
|                 |       |            | a flujos           |
|                 |       |            | descontados.       |
| Tasa Interna de | %     | Razón      | Cálculo de la tasa |
| Retorno (TIR).  |       |            | de equilibrio      |
|                 |       |            | financiero.        |
| Periodo de      |       |            | Cálculo de         |
| Recuperación de | Años  | Razón      | tiempo de          |
| la Inversión    |       |            | recuperación del   |
| (PRI).          |       |            | CAPEX.             |
| Escenarios      |       |            |                    |
| resultantes del |       |            | Iteración de       |
| análisis de     | USD   | Intervalo* | fluctuaciones del  |
| sensibilidad    |       |            | precio del gas vs  |
| tarifaria (VAN  |       |            | VAN.               |
| por estrés).    |       |            |                    |

*\*Aclaración estadística sobre el VAN: Aunque en finanzas corporativas los valores monetarios de inversión y costos se catalogan bajo una escala de razón (ya que el cero implica ausencia de valor), el VAN ( $I_0 + \sum$ ) puede cruzar el eje y asumir valores negativos.*

Por consistencia estadística, los indicadores que pueden arrojar resultados financieros negativos se tipifican en escala de intervalo.

**Tabla 7. Matriz de Correspondencia Hipotética y Decisión**

| Hipótesis de Investigación<br>(H1)           | Dimensión          | Variables Críticas e Indicadores                                                                           | Criterio Analítico de Aceptación                                                                                           |
|----------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Mejora del desempeño técnico.</b>         | Técnica            | Eficiencia térmica, tasa de vapor generada, consumo específico y capacidad volumétrica del almacenamiento. | Dimensionamiento suficiente, ausencia de cuellos de botella y maximización del aprovechamiento de la energía primaria.     |
| <b>Reducción del impacto ambiental.</b>      | Ambiental          | Concentración y carga de CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , Material Particulado (PM) y NO <sub>x</sub> . | Evidencia teórica de valores proyectados numéricamente inferiores a la línea base asumiendo idéntica demanda térmica útil. |
| <b>Viabilidad económico-financiera.</b>      | Económica          | Inversión (CAPEX), VAN, TIR y PRI.                                                                         | Aprobación rígida de los criterios: $VAN > 0$ , $TIR > TMAR$ , y PRI menor a 10 años (horizonte del flujo de caja).        |
| <b>Convalidación del resultado integral.</b> | Ejes Transversales | Integración sinérgica de los tres resultados anteriores.                                                   | La hipótesis admite aceptación total, rechazo categórico o <b>aceptación parcial</b> (ej. éxito técnico/ambiental acoplado |

---

a un revés financiero bajo el  
tarifario base).

---

## **1.6 Marco Metodológico**

El marco metodológico se estructuró para evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica de la sustitución de Búnker C por Gas Licuado de Petróleo en un sistema industrial de generación de vapor, la investigación se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental, debido a que no se efectuó una reconversión física de las calderas ni se manipularon deliberadamente las condiciones de operación.

El estudio se planteó como un caso técnico referencial correspondiente a una empresa del sector atunero del cantón Manta, por lo que, por motivos de confidencialidad empresarial, la organización no fue identificada y la información operativa disponible se presentó de manera agregada, mientras que los parámetros que no fueron proporcionados por la empresa se complementaron con valores técnicos documentales aplicables a calderas pirotubulares de características equivalentes.

El procedimiento metodológico integró la revisión de literatura científica, normas técnicas, registros operativos agregados, balances de masa y energía, estimaciones ambientales y análisis financiero incremental, de modo que cada valor utilizado en el modelo fue clasificado según su procedencia como dato agregado, parámetro documental, supuesto de modelación o resultado calculado, una diferenciación que permitió mantener la trazabilidad de la información y evitar que los valores referenciales fueran interpretados como mediciones particulares de una instalación industrial.

Los resultados obtenidos representan una evaluación preliminar de ingeniería, en consecuencia, no constituyen una auditoría energética certificada, una prueba completa de desempeño conforme a ASME PTC 4 ni una verificación oficial de cumplimiento ambiental. Su aplicación en una instalación específica requiere actualizar la información con datos reales de operación, propiedades de los combustibles, cotizaciones, condiciones espaciales y requisitos normativos particulares.

### **1.6.1 Modalidad Básica de la Investigación**

Para cumplir los objetivos establecidos, la investigación combinó las modalidades bibliográfica-documental y de campo con un diseño no experimental, donde la modalidad bibliográfica-documental permitió sustentar los fundamentos técnicos, ambientales, económicos y normativos del proyecto, mientras que la modalidad de campo se limitó a la utilización de información operativa agregada correspondiente al sistema de generación de vapor analizado.

La combinación de estas modalidades permitió construir la línea base con Búnker C y desarrollar el escenario proyectado con GLP, no obstante, el componente de campo no incluyó pruebas experimentales, monitoreos certificados ni intervenciones físicas sobre los equipos. Los resultados del escenario propuesto fueron obtenidos mediante cálculos y modelación.

#### **1.6.1.1 Investigación Bibliográfica–Documental**

La investigación bibliográfica-documental permitió recopilar, analizar y organizar información relacionada con calderas pirotubulares, combustión industrial, eficiencia energética, propiedades del Búnker C y del GLP, emisiones atmosféricas, seguridad industrial y evaluación financiera de proyectos.

Bernal (2010) señala que la investigación documental se fundamenta en el análisis sistemático de información registrada en distintas fuentes, con el propósito de ampliar el conocimiento sobre un fenómeno determinado. En este estudio se revisaron artículos científicos, libros especializados, normas técnicas, legislación nacional, trabajos de titulación, publicaciones institucionales y boletines oficiales.

Entre las fuentes técnicas utilizadas se consideraron los criterios del método indirecto establecidos en ASME PTC 4 para el análisis energético, factores de emisión aplicables a la combustión estacionaria, normativa ambiental ecuatoriana, disposiciones relacionadas con instalaciones de GLP y precios oficiales de combustibles. También se revisaron documentos sobre evaluación financiera para estructurar el flujo de caja incremental y calcular el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno y el Periodo de Recuperación de la Inversión.

La revisión documental también incluyó registros operativos agregados del caso analizado. Estos documentos se emplearon para establecer la jornada laboral, el consumo diario de Búnker C, la cantidad de calderas y determinados costos operativos. La información faltante fue complementada mediante parámetros técnicos de referencia, los cuales se identificaron expresamente como supuestos de modelación.

#### **1.6.1.2 Investigación de Campo**

La investigación incorporó un componente de campo de alcance limitado, relacionado con la recopilación de información operativa del sistema de generación de vapor perteneciente al caso técnico referencial. Esta modalidad permitió contextualizar el funcionamiento general de las calderas, la jornada de operación, el consumo agregado de combustible y las actividades de mantenimiento asociadas al uso de Búnker C.

Arias (2012) define la investigación de campo como aquella que obtiene información directamente del contexto donde ocurre el fenómeno estudiado, en la presente investigación, esta modalidad no implicó la ejecución de ensayos experimentales ni la medición directa de emisiones por parte del investigador. La información se obtuvo mediante registros agregados y antecedentes operativos proporcionados para el desarrollo académico del proyecto.

Debido a las políticas de confidencialidad de la empresa privada, no se incluyeron nombres comerciales, ubicaciones específicas, números de serie, marcas de equipos, facturas, volúmenes de producción ni documentos que permitieran identificar a la organización, tampoco se presentaron los parámetros agregados como resultados de una auditoría certificada.

Los valores de temperatura de gases, eficiencia térmica, exceso de aire y demás condiciones termo-operativas utilizados en el modelo se trataron como parámetros referenciales cuya finalidad fue representar técnicamente la línea base y permitir la comparación con el escenario proyectado con GLP, por lo cual estos valores deberán ser sustituidos por mediciones instrumentales verificadas antes de una implementación industrial.

### **1.6.1.3 Diseño No Experimental**

La investigación presentó un diseño no experimental, debido a que no se manipularon físicamente las variables ni se efectuó la sustitución de combustible en las calderas analizadas. Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2014) indican que en este tipo de diseño los fenómenos se estudian sin modificar deliberadamente sus condiciones, mediante la observación y análisis de la información disponible.

La variable independiente correspondió al tipo de combustible considerado en cada escenario: Búnker C en la línea base y GLP en el escenario proyectado. Esta variable no fue modificada mediante una intervención real, sino representada a través de las propiedades energéticas, físicas y económicas de ambos combustibles.

La variable dependiente fue la viabilidad integral de la sustitución, analizada mediante las dimensiones técnica, ambiental y económica, para lo cual se compararon indicadores como eficiencia térmica, producción de vapor, consumo de combustible, emisiones directas de dióxido de carbono, requerimientos de almacenamiento, inversión inicial y resultados financieros.

El diseño permitió evaluar los posibles efectos de la reconversión mediante balances de masa y energía, cálculos de consumo, dimensionamiento preliminar, factores de emisión y flujo de caja incremental, por tanto, las diferencias entre los escenarios corresponden a resultados de modelación y no a una comprobación experimental de causa y efecto.

La investigación también presentó un corte transversal, porque la línea base se construyó con información correspondiente a un periodo de referencia. A partir de esos datos se efectuaron proyecciones técnicas, ambientales y financieras para un horizonte de evaluación de diez años. Esto no significa que se haya realizado un seguimiento longitudinal de la operación real durante todo ese periodo

### **1.6.2 Enfoque**

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, debido a que la evaluación de la viabilidad se sustentó en datos numéricos, relaciones matemáticas e indicadores técnicos, ambientales y financieros. Hernández Sampieri et al. (2014) señalan que este enfoque

permite analizar fenómenos mediante mediciones, cálculos y procedimientos estructurados, con el propósito de responder preguntas de investigación y contrastar hipótesis.

En el componente técnico se utilizaron variables como consumo de combustible, poder calorífico, eficiencia térmica, producción de vapor, flujo promedio y máximo de GLP, capacidad de almacenamiento y factor de carga. En la dimensión ambiental se estimaron las emisiones directas de dióxido de carbono asociadas al consumo energético de cada escenario, en la dimensión económica se calcularon la inversión inicial, los costos operativos, el flujo de caja incremental, el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno y el Periodo de Recuperación de la Inversión.

El tratamiento cuantitativo no incluyó inferencia estadística sobre el sector atunero ni pruebas de significancia, debido a que la investigación no trabajó con una muestra probabilística de empresas o calderas, los cálculos se aplicaron al caso técnico referencial definido y sus resultados se interpretaron dentro de los supuestos establecidos.

### **1.6.3 Nivel de Investigación**

El estudio se desarrolló con un nivel descriptivo y un componente analítico. La fase descriptiva permitió caracterizar la línea base con Búnker C, mientras que el componente analítico permitió comparar el comportamiento proyectado de ambos combustibles y valorar sus efectos sobre el desempeño térmico, ambiental y económico.

Aunque la estructura institucional mantiene los niveles descriptivo y explicativo, este último se aborda mediante relaciones técnicas sustentadas en balances, propiedades de los combustibles y modelación. No se realizó una comprobación experimental de causalidad, debido a que el combustible no fue sustituido físicamente durante la investigación.

#### **1.6.3.1 Nivel Descriptivo**

El nivel descriptivo se empleó para caracterizar el sistema de generación de vapor considerado en el caso técnico referencial. Méndez (2011) señala que los estudios descriptivos permiten identificar características, condiciones y comportamientos de un fenómeno dentro de un contexto determinado.

En esta investigación se describieron la configuración general del parque térmico, la cantidad de calderas, la jornada operativa, el consumo agregado de Búnker C, la eficiencia térmica referencial, las condiciones termo-operativas adoptadas y las actividades de mantenimiento asociadas al combustible residual.

También se caracterizaron los costos cuantificables de la línea base y los parámetros utilizados para construir el escenario con GLP. La descripción no pretendió representar estadísticamente a todas las empresas atuneras de Manta, sino establecer las condiciones del caso referencial sobre las cuales se desarrollaron los balances y proyecciones posteriores.

#### **1.6.3.2 Nivel Explicativo**

El componente explicativo se orientó a analizar las relaciones técnicas existentes entre el tipo de combustible y los resultados energéticos, ambientales y económicos del sistema. Bernal (2010) señala que la investigación explicativa busca comprender las razones y relaciones vinculadas con un fenómeno; sin embargo, en el presente estudio estas relaciones se examinaron mediante modelación y no por experimentación directa.

La sustitución proyectada del Búnker C por GLP modificó variables como el poder calorífico, la densidad, el exceso de aire, la energía requerida, el consumo de combustible y los factores de emisión, a partir de estos parámetros se estimaron variaciones en la eficiencia térmica, las emisiones directas de CO<sub>2</sub>, la capacidad de almacenamiento y los costos anuales de operación.

La relación entre el cambio de combustible y los resultados obtenidos debe interpretarse como una asociación técnica construida mediante balances y supuestos de ingeniería, por tanto, no se afirma que la investigación haya demostrado experimentalmente una relación causal definitiva entre el GLP, la eficiencia y las emisiones reales de las calderas.

#### **1.6.4 Población de Estudio**

La población del estudio estuvo constituida por el sistema de generación de vapor considerado dentro del caso técnico referencial. Este sistema se integró por cinco calderas

pirotubulares utilizadas para abastecer las necesidades térmicas de una empresa manufacturera del sector atunero.

Las unidades compartían una misma función general dentro del proceso productivo y operaban con Búnker C como combustible de línea base, debido a las restricciones de confidencialidad, no se presentaron datos individuales de marca, modelo, número de serie, ubicación o capacidad específica de cada equipo.

La población no se definió con fines de inferencia estadística hacia todo el sector atunero, las cinco calderas representaron el sistema térmico incluido en el alcance del caso de estudio y sirvieron como referencia para construir los escenarios técnicos y económicos.

#### **1.6.5 Tamaño de la Muestra**

No se aplicó un procedimiento de muestreo probabilístico ni no probabilístico, debido a que la investigación consideró la totalidad del sistema de generación de vapor incluido en el caso técnico referencial. En consecuencia, las cinco calderas no constituyeron una muestra seleccionada por conveniencia, sino las unidades comprendidas dentro del alcance definido.

Tampoco se realizó un cálculo de tamaño muestral, porque el propósito no fue estimar parámetros poblacionales ni generalizar estadísticamente los resultados a todas las industrias atuneras de Manta, el análisis se concentró en la evaluación integral del sistema considerado.

Los resultados obtenidos corresponden únicamente al escenario modelado y no permiten afirmar que todas las calderas pirotubulares del sector presenten los mismos consumos, eficiencias, emisiones o costos, de ahí que para aplicar el procedimiento en otra instalación será necesario sustituir los parámetros del modelo por información particular de sus equipos y condiciones de operación.

#### **1.6.6 Técnicas de recolección de datos**

Para obtener y organizar la información necesaria se emplearon técnicas compatibles con el carácter cuantitativo, no experimental y referencial de la investigación. Estas técnicas permitieron construir la línea base con Búnker C, modelar el escenario con GLP y desarrollar las evaluaciones técnica, ambiental y económica.

- **Revisión documental**

La revisión documental permitió recopilar información procedente de registros operativos agregados, fichas técnicas, normas, artículos científicos, trabajos de titulación, legislación y publicaciones institucionales, siendo esta técnica la utilizada para identificar propiedades de los combustibles, criterios de eficiencia, factores de emisión, precios oficiales, parámetros de seguridad y procedimientos de evaluación financiera.\

Los documentos internos proporcionados se utilizaron de manera agregada debido a las restricciones de confidencialidad, no se incluyeron facturas, bitácoras individuales ni información que permitiera identificar a la empresa analizada.

- **Análisis técnico**

El análisis técnico permitió organizar los parámetros del sistema de generación de vapor y establecer las relaciones necesarias para efectuar los balances de masa y energía, se consideraron variables como consumo de combustible, poder calorífico, eficiencia térmica, producción de vapor, exceso de aire y jornada operativa.

Este método también se empleó para distinguir la capacidad nominal de producción media y establecer los requisitos iniciales para la regulación, el almacenamiento y la vaporización del sistema con GLP.

- **Modelación termodinámica**

La modelación termodinámica se aplicó para representar el comportamiento proyectado del sistema con GLP sin efectuar una conversión física de las calderas. El escenario propuesto se construyó manteniendo una misma demanda de energía útil y sustituyendo las propiedades energéticas y físicas del Búnker C por las correspondientes al GLP.

Los resultados obtenidos mediante esta técnica corresponden a proyecciones de ingeniería y no a mediciones posteriores a una implementación real.

- **Estimación ambiental**

La estimación ambiental permitió calcular las emisiones directas de dióxido de carbono asociadas al consumo energético de cada combustible, para ello se utilizaron factores de emisión documentales y una misma base de energía útil.

El comportamiento de otros contaminantes, como dióxido de azufre, material particulado, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono, se analizó de forma cualitativa o referencial cuando no existían datos suficientes para realizar una cuantificación reproducible.

- **Evaluación económico-financiera**

La evaluación económico-financiera se desarrolló mediante un flujo de caja incremental proyectado a diez años, se compararon la inversión inicial, los costos de los combustibles y los costos operativos cuantificables de ambos escenarios.

Los principales indicadores utilizados fueron el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno y el Periodo de Recuperación de la Inversión, también se incorporó un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto de variaciones en los precios, el CAPEX y los beneficios operativos.

- **Instrumentos y fuentes de información**

Los instrumentos y fuentes utilizados fueron:

- Registros operativos agregados.
- Matrices de recopilación y clasificación de datos.
- Fichas técnicas de combustibles y equipos.
- Normas técnicas y documentos legales.
- Boletines oficiales de precios.
- Tablas de propiedades termodinámicas.
- Factores de emisión documentales.
- Hojas electrónicas de cálculo.

La hoja de cálculo se utilizó como herramienta de procesamiento y no como instrumento independiente de recolección.

### **1.6.7 Plan de recolección de datos**

El plan de recolección se estructuró para asegurar que la información empleada guardara relación directa con los objetivos específicos. Debido al carácter referencial del

estudio, la recopilación se concentró en información agregada, documentación técnica y parámetros de modelación.

**Tabla 8. Plan de recolección y clasificación de datos**

| <b>N.º</b> | <b>Pregunta orientadora</b>                 | <b>Aplicación en la investigación</b>                                                                                                                                                   |
|------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1</b>   | ¿Para qué se recopilaron los datos?         | Para construir la línea base con Búnker C, modelar el escenario con GLP y evaluar su viabilidad técnica, ambiental y económica.                                                         |
| <b>2</b>   | ¿De qué fuentes procedieron?                | De registros operativos agregados, documentación técnica, normas, artículos científicos, publicaciones institucionales y boletines oficiales.                                           |
| <b>3</b>   | ¿Qué variables se analizaron?               | Consumo de combustible, eficiencia térmica, producción de vapor, exceso de aire, emisiones directas de CO <sub>2</sub> , capacidad de almacenamiento, costos e indicadores financieros. |
| <b>4</b>   | ¿Quién realizó el análisis?                 | El investigador responsable del trabajo de titulación.                                                                                                                                  |
| <b>5</b>   | ¿En qué periodo se obtuvo la información?   | Durante el periodo académico definido para la investigación y con base en el periodo de referencia adoptado para los datos operativos y precios.                                        |
| <b>6</b>   | ¿Dónde se originó la información operativa? | En el sistema de generación de vapor correspondiente al caso técnico referencial de una empresa atunera de Manta.                                                                       |
| <b>7</b>   | ¿Con qué frecuencia se trataron los datos?  | Los datos operativos se utilizaron de forma agregada; los precios y parámetros documentales correspondieron a los periodos seleccionados para el modelo.                                |

|    |                                     |                                                                                                                             |
|----|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8  | ¿Qué técnicas se aplicaron?         | Revisión documental, análisis técnico, modelación termodinámica, estimación ambiental y evaluación financiera.              |
| 9  | ¿Qué instrumentos se utilizaron?    | Matrices de datos, fichas técnicas, normas, publicaciones oficiales, tablas termodinámicas y hojas electrónicas de cálculo. |
| 10 | ¿Cómo se garantizó la trazabilidad? | Cada valor se clasificó como dato agregado, parámetro documental, supuesto de modelación o resultado calculado.             |

*Nota. La tabla describe el procedimiento de recopilación utilizado en el estudio. No se realizaron mediciones instrumentales directas ni monitoreos certificados por parte del investigador.*

La información se organizó según su función dentro del modelo. Los datos operativos agregados fueron utilizados para construir la línea base; los parámetros documentales permitieron completar las propiedades técnicas de los combustibles y equipos; los supuestos definieron las condiciones del escenario proyectado; y los resultados calculados se obtuvieron mediante balances, conversiones y procedimientos financieros.

Esta clasificación permitió evitar que un dato de referencia fuera presentado como una medición específica de la empresa. También facilitó la revisión de coherencia entre los capítulos y la reproducción del procedimiento en instalaciones con características similares.

### **1.6.8 Procesamiento de la Información**

El procesamiento de la información se realizó mediante un procedimiento cuantitativo y secuencial orientado a construir la línea base con Búnker C, modelar el escenario con GLP y comparar ambos sistemas desde las dimensiones técnica, ambiental y económica.

Debido a las políticas de confidencialidad aplicadas por las empresas del sector atunero, el estudio no identifica a la organización analizada ni presenta información comercial, productiva o técnica que permita reconocerla, razón por la cual los datos operativos disponibles fueron tratados de manera agregada, mientras que los parámetros no suministrados se complementaron con valores técnicos de referencia correspondientes a

calderas pirotubulares industriales, propiedades energéticas de los combustibles y precios publicados por organismos oficiales.

Para asegurar la trazabilidad del modelo, cada valor fue clasificado según su procedencia como:

- Dato operativo agregado.
- Parámetro documental.
- Supuesto de modelación.
- Resultado calculado.

Esta clasificación permitió diferenciar la información procedente del caso referencial de aquella obtenida mediante literatura técnica, normas, boletines oficiales o cálculos propios, en consecuencia, las cifras obtenidas representan un escenario de evaluación y no una auditoría energética certificada de una instalación particular.

El procesamiento se desarrolló en cuatro etapas: sistematización y depuración de la información, modelado termodinámico, evaluación ambiental y análisis económico-financiero. En cada fase se verificó la consistencia de unidades, periodos, fuentes y bases de cálculo antes de integrar los resultados.

#### **1.6.8.1 Sistematización y Depuración de Datos**

La información recopilada se organizó en matrices electrónicas de datos para facilitar su clasificación, revisión y procesamiento. Las variables fueron agrupadas en tres dimensiones:

- Técnicas.
- Ambientales.
- Económicas.

Dentro de la dimensión técnica se incluyeron el consumo de combustible, la jornada operativa, la eficiencia térmica, la producción de vapor, el poder calorífico, la densidad y los requerimientos de almacenamiento y vaporización.

En la dimensión ambiental se organizaron los factores de emisión, la energía anual consumida y las emisiones directas de dióxido de carbono. También se identificaron los

contaminantes atmosféricos relevantes para la comparación, aunque no todos pudieron cuantificarse por falta de información específica.

En la dimensión económica se incluyeron la inversión inicial, los precios oficiales de los combustibles, los costos operativos cuantificables, el flujo incremental, la tasa de descuento y los indicadores financieros.

La depuración no consistió en eliminar automáticamente datos que se desviaran de una media estadística, debido a que no se trabajó con una base amplia de mediciones instrumentales. El procedimiento se orientó a detectar:

- Valores duplicados.
- Unidades incompatibles.
- Periodos diferentes.
- Errores de conversión.
- Datos sin fuente identificable.
- Parámetros que no correspondían al mismo escenario.
- Cifras presentadas como mediciones cuando en realidad eran supuestos.

Los valores que no contaban con trazabilidad suficiente no fueron utilizados como evidencia definitiva, cuando resultaron necesarios para completar el modelo, se mantuvieron únicamente como supuestos técnicos claramente identificados.

La consistencia se verificó mediante comparaciones internas entre consumo, energía de entrada, eficiencia y producción de vapor. También se revisó que los precios correspondieran a las unidades comerciales reales de cada combustible y que las proyecciones económicas utilizaran un mismo horizonte temporal.

#### **1.6.8.2 Modelado Termodinámico y Cálculo de Eficiencia**

El modelado termodinámico se desarrolló mediante balances de masa y energía aplicados a los escenarios con Búnker C y GLP. El procedimiento utilizó como referencia las conceptualizaciones del método indirecto de ASME PTC 4; sin embargo, es fundamental aclarar que estos cálculos corresponden a una simulación y modelación de ingeniería

preliminar (pre-FEED), y no constituyen una auditoría energética certificada ni una prueba de desempeño isocinética in situ.

La línea base se construyó a partir del consumo agregado de Búnker C, la jornada operativa, el poder calorífico inferior y la eficiencia térmica referencial. La energía de entrada se calculó mediante:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{m}_f \times PCI_f$$

La energía útil se determinó mediante:

$$\dot{Q}_{útil} = \dot{Q}_{entrada} \times \eta$$

A partir de la energía útil y de la diferencia de entalpía entre el vapor producido y el agua de alimentación, se estimó la producción promedio de vapor:

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{Q}_{útil}}{h_v - h_{aa}}$$

El escenario con GLP se modeló manteniendo constante la demanda de energía útil. Para ello se sustituyeron las propiedades energéticas del Búnker C por las del GLP y se adoptó una eficiencia térmica proyectada.

El flujo promedio de GLP se utilizó para determinar el consumo diario y anual, mientras que el flujo máximo se empleó para dimensionar preliminarmente el vaporizador, los reguladores y los dispositivos de suministro.

El dimensionamiento del almacenamiento se calculó a partir del consumo diario, la autonomía adoptada y el porcentaje de llenado considerado:

$$V_{útil} = V_{diario} \times D_{autonomía}$$

$$V_{nominal} = \frac{V_{útil}}{f_{llenado}}$$

Los resultados del escenario con GLP corresponden a una proyección de ingeniería. Su validación definitiva requeriría pruebas de combustión, mediciones de eficiencia y verificación de la curva real de demanda de vapor.

### 1.6.8.3 Evaluación Ambiental y Cumplimiento Legal

La evaluación ambiental se desarrolló mediante la estimación de las emisiones directas de dióxido de carbono generadas por la combustión de Búnker C y GLP. El cálculo se realizó a partir de la energía anual consumida y de factores de emisión documentales.

La emisión de cada escenario se determinó mediante:

$$E_{CO_2} = E_{combustible} \times FE_{CO_2}$$

Donde:

- $E_{CO_2}$ : emisiones directas de dióxido de carbono.
- $E_{combustible}$ : energía anual suministrada por el combustible.
- $FE_{CO_2}$ : factor de emisión correspondiente.

La comparación se efectuó para una misma demanda de energía útil, con el fin de evitar una evaluación basada únicamente en volúmenes de combustible.

El resultado se expresó en toneladas de CO<sub>2</sub> por año y no en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, debido a que no se incorporaron emisiones de metano, óxido nitroso ni otros gases de efecto invernadero.

El análisis de dióxido de azufre, material particulado, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y opacidad se desarrolló de manera cualitativa o referencial cuando no existían datos suficientes para una cuantificación reproducible, no se asignaron concentraciones exactas sin información sobre composición del combustible, caudal de gases, corrección de oxígeno y métodos de medición.

La comparación con la normativa ambiental ecuatoriana se utilizó únicamente como referencia técnica, no se emitió un dictamen oficial de cumplimiento o incumplimiento, debido a que no se contó con:

- Medición acreditada.
- Clasificación individual de cada fuente.
- Fecha de autorización.
- Condición normativa específica.
- Corrección a base seca y porcentaje de oxígeno aplicable.

Por tanto, el resultado ambiental se interpretó como una estimación prospectiva y no como una certificación legal.

#### **1.6.8.4 Análisis Económico-Financiero**

El análisis económico-financiero se desarrolló mediante un flujo de caja incremental proyectado a diez años. Este enfoque permitió comparar exclusivamente los costos y beneficios que cambian entre la línea base con Búnker C y el escenario con GLP.

La inversión inicial incluyó, de manera referencial:

- Quemadores.
- Sistema de almacenamiento.
- Vaporizador.
- Tren de regulación.
- Obras civiles.
- Dispositivos de seguridad.
- Ingeniería.
- Permisos.

Los costos operativos considerados fueron:

- Consumo anual de combustible.
- Aditivos.
- Costos auxiliares cuantificables.

No se incorporaron como ahorros definitivos aquellos conceptos que carecían de respaldo suficiente, como las horas productivas recuperadas o la eliminación total del consumo eléctrico. El consumo del vaporizador también se mantuvo pendiente de la ficha técnica del equipo.

El flujo incremental se calculó mediante:

$$FNE_t = OPEX_{línea\ base} - OPEX_{GLP}$$

La rentabilidad se evaluó mediante el Valor Actual Neto:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FNE_t}{(1+i)^t}$$

Donde:

- $I_0$ : inversión inicial.
- $FNE_t$ : flujo neto incremental del periodo.
- $i$ : tasa de descuento.
- $n$ : horizonte de evaluación.

Además, se examinó el Período de Recuperación de la Inversión y la Tasa Interna de Retorno. Cuando los flujos se mantuvieron negativos a lo largo de todo el horizonte, no se encontró una TIR positiva que pudiera ser interpretada económicamente ni una recuperación de la inversión.

El análisis se complementó con una sensibilidad aplicada a:

- Precio del GLP.
- Precio del Búnker C.
- CAPEX.
- Eficiencia térmica.
- Ahorros operativos.
- Costos auxiliares.

Este procedimiento permitió identificar las condiciones bajo las cuales la reconversión podría alcanzar el equilibrio financiero. Los resultados se interpretaron como una evaluación preliminar y deben actualizarse mediante cotizaciones, contratos de suministro y costos reales antes de adoptar una decisión de inversión.

## Capítulo 2

### 2 Diagnóstico o Estudio de Campo

El diagnóstico se estructura a partir de un caso técnico referencial fundamentado en el sistema de generación de vapor de una planta procesadora de atún en el cantón Manta. En acatamiento a los acuerdos de confidencialidad corporativa, la razón social de la organización y cualquier metadato que vulnere su anonimato permanecen bajo estricta reserva, en consecuencia, el presente capítulo conjuga métricas operativas agregadas con constantes documentales de ingeniería, aplicables a calderos pirotubulares de especificaciones electromecánicas equivalentes.

Los resultados derivados de esta sección no pretenden acreditarse como una auditoría energética ISO 50001, ni fungen como un dictamen de integridad mecánica (*Fitness-For-Service*) sobre el parque de equipos, toda vez que su único propósito metodológico es establecer una línea base termodinámica coherente que viabilice la contrastación analítica entre el régimen actual con Búnker C y el escenario prospectivo operando con GLP.

#### 2.1 Análisis situacional

El análisis situacional aborda la topología general de la red de vapor, el régimen de trabajo parametrizado en el modelo, la tasa másica de combustible consumido, el rendimiento térmico de referencia y la criticidad del mantenimiento predictivo y correctivo inherente a la quema de residuales pesados. Para salvaguardar la robustez científica del estudio, se declara explícitamente el origen de cada parámetro; esto previene la tergiversación de variables documentales o axiomas de modelación como si se trataran de capturas empíricas directas de la planta analizada.

##### 2.1.1 Evaluación Técnica de la Línea Base (Búnker C).

La línea base radiografía las condiciones operativas *as-is* (estado actual) con Búnker C, erigiéndose como el marco de referencia inercial para evaluar los méritos de la reconversión tecnológica. Dado el sigilo empresarial, los flujos y consumos se reportan de forma agregada a nivel de planta, supliendo las lagunas de información con estándares

industriales conservadores. Por consiguiente, la matriz de datos representa el comportamiento macro del escenario modelado, invalidando su uso como la ficha técnica individual de cada caldero.

#### **2.1.1.1 Caracterización general de los equipos**

La matriz térmica en estudio comprende una batería de cinco calderos pirotubulares horizontales, abocados a la producción ininterrumpida de vapor saturado, para asegurar la anonimización geométrica de la planta, las unidades se han codificado alfanuméricamente desde CB-01 hasta CB-05, suprimiendo de los registros los números de serie, *tags* de instrumentación, *vendors* (marcas) y coordenadas exactas de *layout*.

La flota de calderos se inscribe dentro de una envolvente térmica de 200 a 800 BHP nominales, a efectos de estandarizar el balance de materia y energía, el modelo asume una unidad térmica equivalente de 400 BHP, magnitud que representa un equipo de capacidad media representativa para este rango. Bajo condiciones radiantes, esta magnitud se traduce en una capacidad nominal de evaporación aproximada de 13.800 lb/h; sin embargo, esta cifra simboliza el límite de placa a máxima potencia (100 % de MCR - *Maximum Continuous Rating*), difiriendo significativamente del flujo másico promedio exigido por el tren de cocción durante la jornada.

La combustión del Búnker C se gestiona a través de quemadores industriales modulantes dotados de sistemas de atomización mecánica o asistida. Esta arquitectura requiere ineludiblemente una red de calentadores de línea, bombas de desplazamiento positivo y un lazo de control riguroso para la relación aire-combustible (AFR). Cabe recalcar que esta investigación excluye la auscultación destructiva o no destructiva del acero de los equipos; en consecuencia, no se emiten juicios de ingeniería sobre la vida útil remanente, fatiga térmica, fluencia lenta (*creep*) o desgaste severo por corrosión bajo tensión.

**Tabla 9.** *Caracterización técnica del sistema de generación de vapor referencial*

| <b>Parámetro Operativo / Diseño</b>  | <b>Unidad</b> | <b>Valor utilizado en modelo</b> | <b>Procedencia del Dato</b>        | <b>Observación Técnica</b>                                       |
|--------------------------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>Número de unidades térmicas</b>   | calderos      | 5                                | Alcance del caso referencial.      | Equipos codificados como CB-01 a CB-05.                          |
| <b>Marca y modelo</b>                | —             | Información reservada            | Confidencialidad empresarial.      | No se emplean nombres comerciales simulados.                     |
| <b>Arquitectura del equipo</b>       | —             | Pirotubular horizontal           | Parámetro general de la industria. | Orientado a la generación de vapor saturado seco.                |
| <b>Configuración geométrica</b>      | —             | 3 o 4 pasos                      | Parámetro documental.              | Función directa del fabricante de cada unidad.                   |
| <b>Rango de capacidad instalada</b>  | BHP           | 200 – 800                        | Parámetro referencial del parque.  | No refleja el dimensionamiento individual por equipo.            |
| <b>Unidad equivalente de modelo</b>  | BHP           | 400                              | Supuesto de modelación.            | Capacidad modular representativa para los cálculos.              |
| <b>Capacidad nominal equivalente</b> | lb/h          | 13.800                           | Resultado algebraico calculado.    | $400 \text{ BHP} \times 34,5 \text{ lb/h} \cdot \text{BHP}^{-1}$ |

|                                             |       |                                                   |                                   |                                                                                      |
|---------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Presión de diseño referencial (MAWP)</b> | psi   | 150 – 250                                         | Parámetro documental estándar.    | No reemplaza el dictamen de la placa de estampe (ASME).                              |
| <b>Presión operativa del escenario</b>      | psi   | 125                                               | Supuesto constante del modelo.    | Define las entalpías y títulos de vapor en las tablas termodinámicas.                |
| <b>Tipo de quemador instalado</b>           | —     | Industrial modulante para combustible residual.   | Parámetro general de planta.      | Mandatorio su adaptación de tren de válvulas o sustitución integral para quemar GLP. |
| <b>Sistema de atomización</b>               | —     | Mecánico por alta presión o asistido por fluidos. | Parámetro general de planta.      | Mecanismo crítico para pulverizar la alta viscosidad del hidrocarburo.               |
| <b>Combustible de la Línea Base</b>         | —     | Búnker C (Fuel Oil No. 6)                         | Definición central del escenario. | Penalizado por la exigencia de prea condicionamiento térmico.                        |
| <b>Jornada de operación</b>                 | h/día | 16                                                | Dato empírico proporcionado.      | Régimen de dos turnos continuos de                                                   |

|                                                             |          |                |                                    |                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------|----------|----------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|                                                             |          |                |                                    | ocho horas cada uno.                                                              |
| <b>Días operativos de planta</b>                            | días/año | 300            | Supuesto de evaluación financiera. | Base cronológica para indexar los flujos de OPEX anuales.                         |
| <b>Consumo agregado de hidrocarburo</b>                     | gal/día  | 540            | Dato agregado empírico.            | Variable pivote para la construcción del balance de la línea base.                |
| <b>Eficiencia térmica de referencia (<math>\eta</math>)</b> | %        | 74,5           | Parámetro agregado del modelo.     | Valor referencial; no constituye un acta de eficiencia certificada por perito.    |
| <b>Antigüedad de las unidades</b>                           | Años     | No determinada | Información no disponible.         | Variable irrelevante para sancionar obsolescencia sin historial de mantenimiento. |
| <b>Estado de integridad mecánica</b>                        | —        | No evaluado    | Fuera del alcance (Out of Scope).  | Demanda de inspecciones API/ASME especializadas (Ej. ultrasonido).                |

*Nota. La matriz consolida las variables macrooperativas empíricas, axiomas de ingeniería y constantes documentales amalgamadas para erigir la simulación técnica, de manera que este cuadro no representa el Data Sheet individualizado de los equipos CB-01 a CB-05 ni avala sus condiciones de operabilidad y seguridad industrial en campo.*

### **Análisis de la parametrización técnica**

La matriz expuesta cimenta las condiciones de frontera sobre las cuales se ejecuta el balance de materia y energía, el dimensionamiento de 200 a 800 BHP mapea el orden de magnitud macro de la planta atunera, mientras que el anclaje a 400 BHP actúa estrictamente como un vector de modelación matemática. Como corolario, la cota de 13.800 lb/h encarna la capacidad máxima de evaporación instalada, discrepando radicalmente de la huella de demanda promedio dictada por los autoclaves del proceso productivo.

La estandarización de la presión de consigna a 125 psi se introduce al modelo para fijar las propiedades intensivas del fluido (temperatura de saturación, calor latente y entalpía del líquido) apoyándose en las tablas de vapor (IAPWS-IF97). Aunque este setpoint operativo dista considerablemente del límite elástico o presión máxima de diseño permisible (150-250 psi), esta holgura termomecánica no exime al recipiente de patologías insidiosas como fatiga cíclica por estrés térmico, adelgazamiento de pared por corrosión carbónica o pitting localizado, puesto que la integridad de las envolventes a presión está condicionada a ensayos no destructivos (END), calibración de válvulas de alivio y protocolos API 510, tareas que trascienden el objeto de esta investigación.

El sostenimiento de la llama bajo Búnker C demanda el abatimiento de la viscosidad cinemática del fluido mediante calor, seguido de su atomización a presión en la boquilla, este mecanismo aerodinámico fractura la película viscosa en una dispersión de microgotas, maximizando el área superficial de contacto íntimo con el oxígeno. El desgaste mecánico de los atomizadores y la inherente carga inorgánica del residual incrementan ostensiblemente la carga de mantenimiento correctivo frente a la inyección pura en fase gaseosa (GLP), no obstante, el impacto cuantitativo de este mantenimiento depende directamente del

fraccionamiento del lote de Búnker, el lazo de control de combustión, el régimen de purgas y la destreza operativa.

En síntesis, la parametrización aquí descrita no decreta por sí sola la obsolescencia técnica ni certifica la viabilidad de la reconversión a gas, su cometido es demarcar el lienzo de ingeniería sobre el cual se calcularán las eficiencias, se iterará el balance másico-térmico y se dimensionará económicamente el prediseño del sistema para almacenamiento de GLP.

## 2.2 Diagnóstico Termodinámico y Ambiental.

El diagnóstico termodinámico se estructuró a partir de parámetros operativos agregados y valores constantes de ingeniería asumidos para configurar la línea base con Búnker C. En estricto apego a las cláusulas de confidencialidad y ante la indisponibilidad de bitácoras de instrumentación (*data loggers*) históricas de la planta, las lecturas de temperatura de escape, oxígeno residual, monóxido de carbono, exceso de aire y tiro de chimenea se catalogan como condiciones referenciales del escenario de modelación, en ningún caso pretenden homologarse con un Test de Desempeño Térmico certificado bajo el código ASME PTC 4.

El conjunto de datos modela un estado termodinámico congruente con la operación típica de un caldero pirotubular alimentado a fuel oil pesado, no obstante, al tratarse de magnitudes agregadas, no representan la radiografía individual de ninguno de los cinco calderos ni confieren validez para aplicar inferencia estadística sobre la variabilidad operativa del parque térmico en su conjunto. Su propósito metodológico estriba en posibilitar el cierre del balance de energía y fijar un *benchmark* (punto de referencia) inercial para contrastar ulteriormente las simulaciones con GLP.

**Tabla 10.** *Parámetros termo-operativos adoptados para la línea base con Búnker C*

| Parámetro     | Unidad | Valor    | Procedencia del | Tratamiento  |
|---------------|--------|----------|-----------------|--------------|
| Fisicoquímico |        | adoptado | Dato            | Metodológico |

|                                                       |                     |       |                                   |                                                              |
|-------------------------------------------------------|---------------------|-------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Temperatura de gases de escape</b>                 | °C                  | 245,0 | Parámetro agregado del escenario. | Magnitud térmica de referencia.                              |
| <b>Temperatura del aire comburente</b>                | °C                  | 30,0  | Condición meteorológica asumida.  | Valor base ambiental local.                                  |
| <b>Oxígeno en gases de combustión (O<sub>2</sub>)</b> | % vol. (base seca)  | 5,2   | Parámetro agregado de planta.     | Trazador para cálculo del exceso de aire.                    |
| <b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>            | % vol. (base seca)  | 11,8  | Parámetro agregado de planta.     | Indicador estequiométrico complementario.                    |
| <b>Monóxido de carbono (CO)</b>                       | ppm                 | 152   | Parámetro agregado de planta.     | Referencia de combustión (no es medición analítica oficial). |
| <b>Exceso de aire (EA)</b>                            | %                   | 31,5  | Variable derivada / calculada.    | Fundamental en el diagnóstico de pérdidas secas.             |
| <b>Tiro de la chimenea</b>                            | in H <sub>2</sub> O | -0,20 | Parámetro de diseño referencial.  | Presión de aspiración negativa (tiro natural o inducido).    |
| <b>Eficiencia térmica referencial (η)</b>             | %                   | 74,5  | Constante adoptada en el modelo.  | Axioma operativo (no es                                      |

---

*Nota. Las variables tabuladas fungen como cimientos matemáticos para erigir la línea base energética, por lo cual carecen de validez legal como acta de ensayo certificada y no representan la huella operativa individualizada de los calderos de la planta atunera.*

La temperatura de salida de los gases ( $T_g$ ) adoptada es de 245 °C, mientras que el aire atmosférico de suministro ( $T_a$ ) ingresa a 30 °C. De este diferencial se obtiene un salto térmico de arrastre igual a:

$$\Delta T = 245\text{ °C} - 30\text{ °C} = 215\text{ °C}$$

Este  $\Delta T$  evidencia que una cuantía significativa de calor sensible se disipa hacia la atmósfera como "pérdidas secas" por chimenea. Sin embargo, el porcentaje exacto de pérdida energética no es una función exclusiva de la temperatura; la termodinámica dicta que también obedece al flujo másico de los gases efluentes, la capacidad calorífica isobárica ( $C_p$ ) de la mezcla de gases y el Poder Calorífico Inferior (PCI) del hidrocarburo.

El oxígeno residual de 5,2 % y su correlato de 31,5 % de exceso de aire tipifican un régimen de combustión marcadamente oxidante, donde operar con un elevado exceso de aire penaliza el rendimiento al incrementar masivamente el volumen de gases de escape que "roban" calor útil del hogar, considerando que la calibración óptima de este parámetro no es un número arbitrario, sino que resulta de la intersección entre la aerodinámica del quemador, la presión de atomización, la curva de carga y la robustez del lazo de control.

El registro de 152 ppm de monóxido de carbono (CO) sirve como trazador incuestionable de oxidación incompleta, por sí misma, esta concentración no acusa una patología específica, ya que la presencia de inquemados gaseosos en calderos a Búnker suele ser multicausal: atomización gruesa por baja temperatura del fluido, premezcla turbulenta deficiente, estrangulamiento focalizado del oxígeno (zonas ricas en combustible) o enfriamiento prematuro de la llama contra las camisas de agua.

La eficiencia estipulada del 74,5 % se introduce al algoritmo como la línea inercial del proyecto, es mandatorio subrayar que no equivale a una eficiencia auditada, ni deriva linealmente del analizador de gases portátil (que suele omitir las pérdidas de radiación en carcasa y convección externa). La sanidad matemática de esta constante se valida a posteriori forzando el cierre del balance másico entre el galonaje diario reportado y la tonelada de vapor asumida.

Este diagnóstico destapa ventanas de optimización evidente en el control del tren de gas, mas no sentencia apriorísticamente que el GLP sea la panacea definitiva. La contrastación cuantitativa de méritos se reservará para el análisis holístico del Capítulo 3.

### 2.2.1 Diagnóstico Ambiental Paramétrico

Ante la indisponibilidad de informes de emisión emanados de un laboratorio acreditado (certificación OAE), el eje ambiental de esta investigación se abstiene de adjudicar dictámenes de cumplimiento legal. Los valores que alimentan el documento se recategorizan formalmente como tasas de emisión teóricas o referenciales, eludiendo la figura de "concentraciones in-situ".

Con el objetivo de blindar el documento contra falsas asunciones de índole jurídica, el diagnóstico del escenario contaminante se vertebra en torno a las siguientes viñetas:

- Catalogación de los contaminantes críticos.
- Mecanismo termoquímico de formación.
- Norma o ensayo fisicoquímico requerido para la auditoría oficial.
- Régimen normativo pertinente.
- Límite o estado de validación dentro de esta investigación.

**Tabla 11.** *Matriz de variables ambientales consideradas para la línea base con Búnker C*

| Contaminant<br>e o Variable | Unidad | Mecanismo de<br>formación /<br>Comportamiento | Método de<br>inspección<br>para | Estado dentro<br>de este estudio |
|-----------------------------|--------|-----------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
|-----------------------------|--------|-----------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|

|                                           |                             |                                                                                            | <b>auditoría<br/>oficial</b>                                     |                                                           |
|-------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                                           |                             |                                                                                            | Método EPA                                                       |                                                           |
| <b>Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)</b> | mg/Nm <sup>3</sup> o kg/año | Función directa de la carga de azufre orgánico del crudo y del caudal quemado.             | reconocido por la normativa ambiental ecuatoriana.               | Estimación documental sin exactitud empírica.             |
|                                           |                             |                                                                                            | Analizador de                                                    |                                                           |
| <b>Óxidos de nitrógeno (NOx)</b>          | mg/Nm <sup>3</sup>          | Catalizados por la temperatura de llama (Thermal NOx) y el N <sub>2</sub> en el fuel oil.  | gases calibrado con corrección al % O <sub>2</sub> en base seca. | Valor teórico referencial, carente de valor certificable. |
|                                           |                             |                                                                                            | Muestreo                                                         |                                                           |
| <b>Material particulado (PM)</b>          | mg/Nm <sup>3</sup>          | Arrastre inercial de cenizas inorgánicas y aglomeración de hollín (asfáltenos inquemados). | Isocinético en chimenea o equivalente normativo.                 | No determinado oficialmente en planta.                    |
|                                           |                             |                                                                                            | Analizador de                                                    |                                                           |
| <b>Monóxido de carbono (CO)</b>           | ppm o mg/Nm <sup>3</sup>    | Trazador de combustión incompleta o quenching (enfriamiento) prematuro.                    | gases calibrado bajo protocolo documentado .                     | Parámetro operativo estrictamente referencial.            |

|                                                    |                              |                                                                                             |                                                                                                      |                                                                |
|----------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>Opacidad</b>                                    | % o Escala<br>Ringelman<br>n | Relacionada con la<br>opacidad óptica y<br>densidad visible del<br>humo particulado.        | Lector óptico<br>o evaluación<br>visual por<br>perito<br>certificado.                                | No determinada<br>oficialmente en la<br>línea base.            |
| <b>Dióxido de<br/>carbono<br/>(CO<sub>2</sub>)</b> | ton<br>CO <sub>2</sub> /año  | Estequiométricamente<br>dependiente de los<br>átomos de carbono<br>oxidados.                | Cálculo<br>algebraico<br>basado en<br>consumo de<br>combustible y<br>factor de<br>emisión<br>(IPCC). | Calculado y<br>proyectado<br>cuantitativamente<br>en la tesis. |
| <b>Cumplimiento<br/>ambiental</b>                  | Cumple /<br>No Cumple        | Sujeto al <i>vintage</i> de la<br>fuente, potencia<br>instalada y<br>combustible utilizado. | Contrastación<br>física de<br>laboratorios<br>vs límites<br>máximos<br>permisibles<br>(TULSMA).      | Fuera de alcance<br>sin datos<br>empíricos<br>acreditados.     |

*Nota. La dictaminación legal de una fuente fija obliga a categorizar el activo, ponderar la edad del equipo, normalizar los flujos efluentes a las condiciones de referencia de oxígeno, y utilizar instrumentación calibrada por laboratorios certificados. En ausencia de estos vectores, el presente trabajo rechaza emitir un certificado de cumplimiento.*

### Consideraciones sobre el marco normativo preliminar

El andamiaje jurídico ambiental del Ecuador (TULSMA) segmenta los techos permisibles de emisión para calderos en atención a cuatro vectores condicionantes:

- Tipo de combustible fósil quemado.

- Fecha de autorización de inicio operativo (*vintage*).
- Categorización de la fuente fija (potencia).
- Condición de referencia estandarizada de corrección de gases.

Por mandato de sigilo corporativo, la investigación carece de acceso a las fechas de *commissioning* (arranque y autorización) de las cinco unidades analizadas, así como de reportes formales de caracterización de gases. De este vacío documental se desprende una única catalogación válida:

|                                        |
|----------------------------------------|
| Cumplimiento normativo no determinable |
|----------------------------------------|

Esta declaratoria previene cualquier inferencia maliciosa al no sancionar a la empresa por un incumplimiento ambiental velado ni absolverla arbitrariamente como industria verde, toda vez que simplemente rubrica que el volumen de evidencia proporcionado para este estudio impide emitir un pronunciamiento con autoridad jurídica.

Desde el rigor de la ingeniería, el marco teórico prevé que la combustión del Búnker C arroje, por su propia naturaleza molecular, concentraciones significativamente más hostiles de SO<sub>2</sub> y PM frente al GLP, empero, la ratificación empírica de estos deltas de concentración está reservada para las auscultaciones isocinéticas pos-reconversión.

### **2.2.2 Cierre del apartado diagnóstico**

La topología de la línea base es representativa de un sistema de generación de vapor maduro, el cual alberga brechas cuantificables de optimización termo-operativa. Las trazas de monóxido de carbono, combinadas con la alta temperatura de chimenea y el desajuste en el exceso de aire, sugieren deficiencias en la modulación dinámica del tren de combustión. Al margen de estos hallazgos técnicos, se reitera que dichos marcadores son postulados académicos que no constituyen una auditoría vinculante ni admiten extrapolación idéntica para los cinco calderos que integran la batería térmica.

En la orilla ambiental, la matriz estructurada identifica eficientemente los pasivos contaminantes propios del residual pesado, deteniéndose en el umbral de la asunción de cumplimientos normativos no sustentados. Así, la evaluación comparativa con la alternativa

gasífera (GLP) se desplegará en el siguiente capítulo anclada a factores de emisión teóricos y al paradigma de la misma carga térmica, difiriendo la declaración de legalidad ambiental hacia la esfera de responsabilidad de la planta, condicionada a monitoreos de autoridad competente.

### 2.3 Diagnóstico Operativo y Estructura de Costos (OPEX actual).

La estructuración de los costos operativos (OPEX) de la línea base se fundamenta en los consumos energéticos y los requerimientos logísticos inherentes a la quema de Búnker C, en congruencia con el enfoque referencial del estudio, las variables de entrada se disgregan según su origen: métricas agregadas de planta, constantes documentales, supuestos de ingeniería o resultados algebraicos derivados.

Este escrutinio financiero rechaza la premisa falaz de que la totalidad de los egresos se suprimirá tras el cambio de hidrocarburo, su objetivo analítico consiste en delimitar los rubros estrictamente cuantificables del sistema actual, erigiendo así una plataforma contable homogénea para contrastar el flujo de caja del escenario prospectivo con GLP.

La arquitectura operativa del modelo asume un régimen de dos turnos diarios de ocho horas, lo que equivale a 16 horas activas por jornada durante 300 días calendario al año, al indexar un consumo agregado de 540 galones diarios de Búnker C, el volumen anual demandado se determina mediante la siguiente ecuación:

$$V_{B, anual} = 540 \frac{\text{gal}}{\text{día}} \times 300 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 162.000 \text{ gal/año}$$

Consecuentemente, el gasto anual directo por concepto de combustible se cuantifica como:

$$C_{B, anual} = V_{B, anual} \times P_B$$

Donde  $P_B$  representa la tarifa oficial o el promedio documental adoptado para el Fuel Oil No. 6 a nivel industrial durante el periodo de evaluación.

**Tabla 12. Línea base operativa y estructura de costos asociados al uso de Búnker C**

| <b>Concepto</b><br><b>Técnico/Económico</b>         | <b>Unidad</b> | <b>Valor</b><br><b>Adoptado</b> | <b>Procedencia</b><br><b>del Dato</b> | <b>Tratamiento</b><br><b>Metodológico</b>                          |
|-----------------------------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Jornada operativa</b>                            | h/día         | 16                              | Dato empírico proporcionado           | Equivalencia a dos turnos de 8 horas.                              |
| <b>Días operativos</b>                              | días/año      | 300                             | Supuesto de evaluación                | Base cronológica común del modelo financiero.                      |
| <b>Horas efectivas de marcha</b>                    | h/año         | 4.800                           | Resultado calculado                   | 16 h/día × 300 días/año.                                           |
| <b>Consumo diario de combustible</b>                | gal/día       | 540                             | Dato agregado                         | Variable pivote de la línea base.                                  |
| <b>Consumo anual de combustible</b>                 | gal/año       | 162.000                         | Resultado calculado                   | 540 gal/día × 300 días/año.                                        |
| <b>Tarifa del Fuel Oil No. 6 (<math>P_B</math>)</b> | USD/gal       | 1,952.285                       | Promedio documental adoptado          | Condicionado a declarar explícitamente el periodo base de mercado. |
| <b>Gasto anual por Búnker C</b>                     | USD/año       | 316.270,17                      | Resultado calculado                   | 162.000 gal/año × 1,952.285 USD/gal.                               |
| <b>Consumo eléctrico de precalentamiento</b>        | kWh/mes       | 4.320                           | Supuesto del escenario                | Requiere sustento de potencia instalada y horas de uso.            |

|                                                            |               |                |                             |                                                                  |
|------------------------------------------------------------|---------------|----------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>Consumo eléctrico anual</b>                             | kWh/año       | 51.840         | Resultado calculado         | 4.320 kWh/mes × 12 meses/año.                                    |
| <b>Tarifa eléctrica industrial (<math>T_{elec}</math>)</b> | USD/kWh       | No determinado | Dato empírico requerido     | Indispensable para su monetización oficial (planilla).           |
| <b>Costo anual de energía auxiliar</b>                     | USD/año       | Pendiente      | Ausencia de tarifa          | Se elide del CAPEX para no falsear balances con supuestos.       |
| <b>Gasto mensual de aditivos químicos</b>                  | USD/mes       | 350            | Dato agregado del escenario | Requiere verificación de facturación/inventario.                 |
| <b>Gasto anual de aditivos químicos</b>                    | USD/año       | 4.200          | Resultado calculado         | 350 USD/mes × 12 meses/año.                                      |
| <b>Labor de limpieza y mantenimiento</b>                   | h-equipos     | 80             | Dato agregado de planta     | Intervención mecánica, no equivale a parada de producción total. |
| <b>Frecuencia anual de mantenimiento</b>                   | h-equipos/año | 960            | Resultado calculado         | 80 h/mes × 12 meses/año.                                         |
| <b>Tarifa unitaria de mantenimiento</b>                    | USD/h-eq      | No determinado | Ausencia de tarifa interna  | No se indexa financieramente.                                    |
| <b>Capacidad nominal instalada</b>                         | lb/h          | 13.800         | Resultado calculado         | Derivado de la unidad equivalente asumida (400 BHP).             |

|                                       |      |       |                      |                                                              |
|---------------------------------------|------|-------|----------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Producción másica promedio</b>     | lb/h | 3.498 | Resultado algebraico | Tasa real ajustada a la eficiencia de la línea base.         |
| <b>Factor medio de carga</b>          | %    | 25,35 | Resultado calculado  | Fracción de uso respecto a la capacidad de placa de 400 BHP. |
| <b>Eficiencia térmica referencial</b> | %    | 74,5  | Parámetro del modelo | Axioma operativo no auditado.                                |

*Nota. Las variables tabuladas se estratifican según su naturaleza de origen. Por rigor contable, los costos carentes de un tarifario auditable o evidencia facturable se excluyen del monto monetario de la línea base. La tarifa del hidrocarburo responde al corte documental empleado y exige indexación si se modifica el horizonte temporal.*

### 2.3.1 Estructuración del costo operativo cuantificable

Aplicando el tarifario estipulado al consumo anual, el gasto por hidrocarburo se cifra en:

$$C_{B, \text{anual}} = 162.000 \text{ gal/año} \times 1,952285 \text{ USD/gal} = 316.270,17 \text{ USD/año}$$

*(Nota: Las desviaciones decimales marginales frente a operaciones previas obedecen a las políticas de redondeo en hoja de cálculo; la evaluación exige congelar el número de cifras significativas).*

Con base en la evidencia documental disponible, el costo operativo directo y auditable se consolida integrando el consumo de hidrocarburo y la dosificación de aditivos químicos:

$$OPEX_{B, \text{cuantificable}} = C_{\text{combustible}} + C_{\text{aditivos}}$$

$$OPEX_{B, \text{cuantificable}} = 316.270,17 + 4.200 = 320.470,17 \text{ USD/año}$$

Esta sumatoria es restrictiva y omite deliberadamente vectores de gasto operativo vitales, tales como:

- Demanda eléctrica del tren de precalentamiento y bombeo.

- Horas-hombre destinadas a limpieza mecánica.
- Reposición de consumibles (repuestos y empaquetaduras).
- Costos marginales por lucro cesante durante paradas.
- Gestión y disposición final de residuos peligrosos (hollín y borras).
- Primas de aseguramiento industrial.

En consecuencia, este dictamen financiero debe catalogarse estrictamente como **OPEX anual cuantificable con la información disponible**, eludiendo la etiqueta de costo operativo total u OPEX absoluto de planta.

### 2.3.2 Tratamiento contable del consumo eléctrico

La cota de 4.320 kWh/mes por concepto de calentamiento de tuberías fuge únicamente como un parámetro físico referencial del diagnóstico. Su traducción monetaria dentro del flujo de caja exige el cruce con la tarifa eléctrica correspondiente:

$$C_{elec, anual} = 51.840 \text{ kWh/año} \times T_{elec}$$

Donde  $T_{elec}$  encarna la tarifa plana industrial en USD/kWh. Ante la reserva de este valor empírico, la línea base anula este gasto. Es imperativo acotar que esta carga eléctrica no se extinguirá íntegramente con la reconversión, en vista de que la arquitectura a GLP demandará suministro eléctrico para vaporizadores o resistencias sumergidas.

#### Cuantificación de las horas de mantenimiento

La métrica de 80 h-equipos/mes refleja el tiempo acumulado de intervención sobre la batería de los cinco calderos, extrapolada bajo la siguiente premisa:

$$5 \text{ equipos} \times 4 \text{ h/intervención} \times 4 \text{ intervenciones/mes} = 80 \text{ h-equipos/mes}$$

Proyectado al ciclo anualizado:

$$80 \times 12 = 960 \text{ h-equipos/año}$$

Si bien este marcador es esencial para medir la frecuencia de correctivos por ensuciamiento (*fouling*), carece de valor económico directo si no se alimenta la siguiente función de costos:

$$C_{mant} = (h_{equipo} \times C_{hora}) + C_{repuestos} + C_{servicios}$$

Asimismo, resulta erróneo castigar estas 960 horas como un freno absoluto a la manufactura de conservas, toda vez que se ignora la redundancia instalada (*stand-by*) y la holgura en el tren de cocción.

### **Interpretación del escenario operativo**

La modelación inercial diagnostica una demanda anual de 162.000 galones de Búnker C, lo cual, bajo el vector de precios adoptado, moviliza un presupuesto de USD 316.270,17 anuales por consumo bruto de combustible, de manera que al añadir los USD 4.200 exigidos para el tratamiento con aditivos, la planta devenga un OPEX cuantificable mínimo garantizado de USD 320.470,17.

Pese a figurar en el balance de masa y energía, la demanda eléctrica auxiliar y el peso del mantenimiento correctivo se relegan del flujo financiero ante la ausencia de tarifas homologables, esto imprime al análisis económico de la línea base un carácter intrínsecamente conservador y parcial.

Termodinámicamente, se corrobora que la capacidad nominal equivalente de 13.800 lb/h representa un techo de diseño y no el régimen real de planta, al acoplar el consumo de hidrocarburo con la eficiencia térmica declarada (74,5 %), la extracción media de vapor se consolida en 3.498 lb/h, operando a un factor de carga del 25,35 %. Esta rectificación técnica blindada la congruencia matemática del modelo, alineando la tasa de combustible con el aprovechamiento de energía útil para garantizar la fiabilidad del análisis económico incremental.

## **Capítulo 3**

### **3 Propuesta de Mejora**

#### **3.1 Ingeniería Preliminar y Balance Térmico Estequiométrico**

La factibilidad termodinámica de la sustitución tecnológica exige normalizar la comparativa bajo un requerimiento constante de energía térmica útil. Si bien la unidad modular adoptada (400 BHP) ostenta una capacidad nominal de placa equivalente a 13.800 lb/h de vapor, esta cota encarna un límite operativo máximo y difiere del régimen de

modulación diario de la planta. Consecuentemente, el vector de demanda térmica media se iteró de forma retrospectiva, partiendo del consumo empírico del Búnker C y la eficiencia inercial del escenario base.

### 3.1.1 Energía de Entrada con Búnker C (Baseline)

Partiendo de la cuota volumétrica agregada de combustible pesado:

$$V_B = 540 \text{ gal/día}$$

Y considerando un ciclo operativo continuo de dos turnos:

$$H = 16 \text{ h/día}$$

Se establece una demanda volumétrica horaria promedio de:

$$\dot{V}_B = \frac{540}{16} = 33,75 \text{ gal/h}$$

Para ejecutar el balance, se asumen constantes reológicas y energéticas típicas del residual pesado reportadas en la literatura técnica (U.S. Energy Information Administration [EIA], s. f.):

- Gravedad específica ( $\rho_B$ ) = 0,99 kg/L
- Poder Calorífico Inferior ( $PCI_B$ ) = 40,4 MJ/kg

Convirtiendo el consumo volumétrico a masa (factor galón US a Litros: 3,7854):

$$m_{B, gal} = 0,99 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times 3,7854 \frac{\text{L}}{\text{gal}} = 3,7475 \text{ kg/gal}$$

La entalpía térmica disponible por unidad comercial es:

$$E_{B, gal} = 3,7475 \text{ kg/gal} \times 40,4 \text{ MJ/kg} = 151,40 \text{ MJ/gal}$$

Por lo tanto, la inyección bruta de energía térmica al hogar del caldero asciende a:

$$\dot{Q}_{entrada,B} = 33,75 \text{ gal/h} \times 151,40 \text{ MJ/gal} = 5.109,75 \text{ MJ/h}$$

### 3.1.2 Demanda de Energía Útil de Referencia

Afectando la energía liberada por el índice de eficiencia térmica global de la línea base ( $\eta_B = 74,5 \%$ ):

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = 5.109,75 \text{ MJ/h} \times 0,745 = 3.806,76 \text{ MJ/h}$$

Transformando esta magnitud al sistema inglés para facilitar el cálculo de vapor (1 MJ = 947,817 BTU):

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = 3.806,76 \text{ MJ/h} \times 947,817 \frac{\text{BTU}}{\text{MJ}} \approx 3.608.000 \text{ BTU/h}$$

Asumiendo un diferencial de entalpía ( $\Delta h$ ) entre el vapor saturado de salida y el agua de alimentación al domo de 1.031,4 BTU/lb (1.193,5 – 162,1), la producción media de vapor extraída resulta en:

$$\dot{m}_v = \frac{3.608.000 \text{ BTU/h}}{1.031,4 \text{ BTU/lb}} \approx 3.498 \text{ lb/h}$$

Esta tasa másica concuerda con un factor de utilización (Carga Media) referencial de:

$$FC = \left( \frac{3.498 \text{ lb/h}}{13.800 \text{ lb/h}} \right) \times 100 \approx 25,35 \%$$

### 3.1.3 Demanda de Energía Proyectada con GLP

Para que la comparativa sea técnicamente equitativa, el escenario gasífero debe satisfacer idéntica carga entálpica:

$$\dot{Q}_{\text{útil, GLP}} = 3.806,76 \text{ MJ/h}$$

La simulación asume un salto en la eficiencia global ( $\eta_{GLP}$ ) al 86,5 %. Este delta de optimización se sustenta ingenierilmente en la estabilización de un menor exceso de aire, la práctica anulación del fouling en los tubos, una modulación más precisa y un menor arrastre de pérdidas secas, comportamiento concordante con evaluaciones comparativas previas de calderos industriales convertidos a gas en el entorno nacional (Saa Zambrano & Valero Pérez, 2024). No constituye, cabe aclarar, el resultado de una prueba empírica.

Bajo esta eficiencia, la tasa térmica de alimentación de GLP exigida será:

$$\dot{Q}_{\text{entrada, GLP}} = \frac{3.806,76 \text{ MJ/h}}{0,865} = 4.401,98 \text{ MJ/h}$$

### 3.1.4 Tasa Másica y Flujo Promedio de GLP

Fijando un Poder Calorífico Inferior ( $PCI_{GLP}$ ) de 47,3 MJ/kg, el flujo másico promedio para sostener la operación normal de planta se calcula como:

$$\dot{m}_{GLP,prom} = \frac{4.401,98 \text{ MJ/h}}{47,3 \text{ MJ/kg}} = 93,07 \text{ kg/h}$$

Extrapolado al sistema inglés (1 kg = 2,20462 lb):

$$\dot{m}_{GLP,prom} = 93,07 \text{ kg/h} = 205,18 \text{ lb/h}$$

### 3.1.5 Requerimiento Diario de Consumo (GLP)

La demanda de masa agregada por jornada asciende a:

$$m_{GLP,día} = 93,07 \text{ kg/h} \times 16 \text{ h/día} = 1.489,12 \text{ kg/día}$$

Tomando una densidad estándar para el GLP en fase líquida establecida en la normativa técnica (Servicio Ecuatoriano de Normalización [INEN], 2010) ( $\rho_{GLP} = 0,54 \text{ kg/L}$ ), el requerimiento volumétrico se fija en:

$$V_{GLP,día} = \frac{1.489,12 \text{ kg/día}}{0,54 \text{ kg/L}} = 2.757,63 \text{ L/día}$$

Que se traduce, ajustando decimales, a un requerimiento neto de galones:

$$V_{GLP,día} \approx 728 \text{ gal/día}$$

### 3.1.6 Proyección Operativa Anualizada

Exigido por la formulación del modelo de negocio financiero (300 días de calendario operativo):

$$m_{GLP,año} = 1.489,12 \text{ kg/día} \times 300 \text{ días/año} = 446.736 \text{ kg/año}$$

O su equivalente volumétrico:

$$V_{GLP,año} = 728,48 \text{ gal/día} \times 300 \text{ días/año} = 218.544 \text{ gal/año}$$

(Debe iterarse que el flujo de caja se alimentará exclusivamente de la métrica en kilogramos, dada la estructura arancelaria industrial).

### 3.1.7 Cálculo del Flujo Máximo para Dimensionamiento Pre-FEED

El dimensionamiento de la infraestructura gasífera no se tolera mediante flujos promedio; la seguridad funcional exige calcular las áreas de paso y vaporización frente al techo térmico (*Maximum Continuous Rating*) del equipo.

Asumiendo la capacidad máxima teórica: 13.800 lb/h

$$\dot{Q}_{\text{útil, máx}} = 13.800 \text{ lb/h} \times 1.031,4 \text{ BTU/lb} = 14.233.320 \text{ BTU/h}$$

Llevado a unidades internacionales:

$$\dot{Q}_{\text{útil, máx}} = \frac{14.233.320 \text{ BTU/h}}{947,817 \text{ BTU/MJ}} \approx 15.016,96 \text{ MJ/h}$$

La demanda térmica brutal (100 % de flama) será:

$$\dot{Q}_{\text{entrada, máx}} = \frac{15.016,96 \text{ MJ/h}}{0,865} = 17.360,65 \text{ MJ/h}$$

Arrojando el *Flujo Másico Pico* o de diseño:

$$\dot{m}_{\text{GLP, máx}} = \frac{17.360,65 \text{ MJ/h}}{47,3 \text{ MJ/kg}} = 367,03 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{GLP, máx}} \approx 367 \text{ kg/h} = 809 \text{ lb/h}$$

Esta magnitud rectora ( $\dot{m}_{\text{GLP, máx}}$ ) gobernará la selección hidráulica de:

- Vaporizadores de fluido térmico o eléctrico.
- Diámetros de tubería de interconexión.
- Estación de regulación de presión (*Skid*).
- Dimensionamiento de PSVs (Válvulas de alivio de presión).

**Tabla 13.** Consolidación del Balance de Energía y Materia Corregido

| Parámetro Dinámico                    | Línea Base<br>(Búnker C) | Escenario Proyectado<br>(GLP) |
|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Jornada productiva                    | 16 h/día                 | 16 h/día                      |
| Energía térmica útil retenida         | 3.806,76 MJ/h            | 3.806,76 MJ/h                 |
| Eficiencia térmica global             | 74,5 %                   | 86,5 %                        |
| Consumo diario equivalente            | 540 gal/día              | 1.489,12 kg/día               |
| Demanda volumétrica aproximada        | 540 gal/día              | 728,48 gal/día (líquido)      |
| Régimen de evaporación media          | 3.498 lb/h               | 3.498 lb/h                    |
| Factor medio de carga                 | 25,35 %                  | 25,35 %                       |
| Tasa de consumo nominal<br>(Promedio) | N/A                      | 93,07 kg/h                    |

|                                                         |     |             |
|---------------------------------------------------------|-----|-------------|
| <b>Tasa de consumo pico (Diseño<br/>MAX)</b>            | N/A | 367,03 kg/h |
| <b>Flujo pico imperial (Referencia de<br/>catálogo)</b> | N/A | 809,11 lb/h |

*Nota. Las matrices de dimensionamiento encarnan un escenario técnico inercial referencial. De cara a un comisionamiento definitivo, la densidad volumétrica y la entalpía deberán enmendarse empleando los Cromatos (certificados de calidad) del despacho comercial de GLP.*

### 3.1.8 Conclusiones de la Ingeniería de Detalle y Modelación Estequiométrica

A fin de asegurar el rigor termodinámico en la evaluación del *fuel switch* tecnológico, la simulación se ancló a una demanda entálpica invariable. Si bien la unidad equivalente asume una capacidad placa de 13.800 lb/h de vapor, esta magnitud no parametriza la curva operativa media. El *back-calculation* (cálculo en reversa) desde el consumo empírico de Búnker C (540 galones/día) devela un requerimiento térmico real de 3.806,76 MJ/h, materializado en una evaporación continua de apenas 3.498 lb/h de vapor (25,35 % de Factor de Carga).

La inyección de GLP fue modelada atribuyéndole un *delta* de eficiencia térmica global hasta el 86,5 %. Esta cota no es arbitraria; obedece fenomenológicamente a la supresión de pérdidas por *fouling* severo, un ajuste milimétrico del lazo de oxígeno libre en escape, y la ausencia de purgas excesivas. Al preservar el requerimiento de calor útil y afectar por el Poder Calorífico (47,3 MJ/kg), la planta exige una dieta promedia de gas de 93,07 kg/h, equivalentes a un volumen líquido de 728 galones diarios de reposición.

Crucialmente, el prediseño de la infraestructura (válvulas, alivios térmicos, lazos de regulación y trenes de vaporización) no debe suscribirse sobre el umbral promedio, puesto que el diseño mecánico estricto (Pre-FEED) se gobierna bajo el techo operativo o flujo máximo, forzando al sistema a manejar un pico proyectado de 367 kg/h (809 lb/h) para satisfacer el 100 % de la capacidad de la caldera en caso de "shocks" de demanda térmica extrema. Separar el flujo de consumo financiero del flujo máximo de diseño mecánico blind

a la investigación contra subdimensionamientos o faltas de caudal en el arranque en frío, si bien todos estos axiomas permanecen subyugados a los Data Sheets del fluido real una vez se conciba un diseño de detalle final.

### 3.2 Diseño del Sistema de Almacenamiento y Tren de Regulación

La arquitectura del sistema receptor y suministrador de GLP se desarrolla bajo los estándares de una ingeniería conceptual preliminar (Pre-FEED), cuyo objetivo rector consiste en dimensionar la capacidad nominal mínima de los recipientes a presión y del tren de vaporización forzada, basándose estrictamente en las demandas energéticas calculadas en la sección anterior, por lo que la validación definitiva de skids, rutados de tubería (piping), distancias normativas y redes contra incendio quedará supeditada al levantamiento as-built de la instalación y a las especificaciones mecánicas del proveedor (OEM).

Las variables térmicas y operativas que gobiernan este dimensionamiento se estructuran a continuación:

- Consumo másico promedio: 1.489,12 kg/día
- Consumo volumétrico referencial: 728,48 gal/día
- Flujo másico promedio: 93,07 kg/h
- Flujo máximo instantáneo de diseño: 367,03 kg/h (Equivalente a 809,11 lb/h)
- Régimen operativo: 16 h/día
- Autonomía objetivo: 15 días
- Factor de seguridad de llenado de recipientes: 85 %

#### 3.2.1 Dimensionamiento del Parque de Almacenamiento

El requerimiento de volumen líquido neto, necesario para garantizar el margen de suministro, se interpola mediante la siguiente ecuación:

$$V_{\text{útil}} = V_{\text{diario}} \times D_{\text{autonomía}}$$

$$V_{\text{útil}} = 728,48 \frac{\text{gal}}{\text{día}} \times 15 \text{ días} = 10.927,20 \text{ gal}$$

Esta magnitud acusa únicamente la reserva inventariable consumible, distando de ser la capacidad geométrica total del recipiente. De acuerdo con los estándares de diseño térmico

para gases licuados (NFPA 58 / ASME VIII), el nivel estático máximo por seguridad de expansión térmica (*ullage*) se adopta al 85 %:

$$V_{\text{nominal}} = \frac{V_{\text{útil}}}{0,85}$$
$$V_{\text{nominal}} = \frac{10.927,20 \text{ gal}}{0,85} = 12.855,53 \text{ gal}$$

Por lo tanto, la capacidad geométrica requerida se consolida en:

$$V_{\text{nominal, mínimo}} \approx 12.900 \text{ gal}$$

### 3.2.1.1 Selección preliminar

Dado que la estandarización volumétrica obedece a las matrices de fabricación metalmecánica de los proveedores, el proyecto prescinde de encasillarse en una medida comercial única en esta fase exploratoria. La condición de frontera establece la exigencia de un recipiente (o batería de recipientes interconectados) cuya capacidad nominal global no sea inferior a 12.900 galones (capacidad agua).

A modo de verificación, si se optara por un *standard* comercial de 12.000 galones, su límite operativo real ( $12.000 \times 0,85 = 10.200 \text{ gal}$ ) entregaría una autonomía reducida a 14 días ( $10.200/728,48$ ). En consecuencia, esta capacidad resulta insuficiente para honrar integralmente la premisa del modelo.

### 3.2.1.2 Alternativas de configuración espacial

Para suplir el requerimiento volumétrico calculado (12.900 gal), la ingeniería mecánica permite adoptar dos arreglos topológicos:

- **Alternativa A (Tanque singular o "bala" única):** Demanda una menor densidad de válvulas y lazos de control, pero concentra íntegramente la carga de fuego (*fire load*) en una sola área, requiriendo distancias radiales de separación más severas hacia los linderos.
- **Alternativa B (Batería en paralelo):** Permite que la redundancia sea flexible, lo que hace posible que un equipo esté en pausa por mantenimiento estatutario (API 510)

mientras el otro funciona; sin embargo, al mismo tiempo incrementa el CAPEX inicial a través de conexiones cruzadas y colectores (manifolds).

No se trata matemáticamente en esta tesis la elección de las dos geometrías, porque depende completamente de la limitación del área disponible (layout) en la planta de atún de Manta.

### **3.2.1.3 Autonomía de seguridad**

El parámetro de 15 días de autonomía se introduce al algoritmo como un postulado de gestión de inventarios y gestión de riesgos logísticos, mas no obedece a un mandato vinculante de la legislación ambiental o de hidrocarburos. Su inclusión busca dotar al sistema de resiliencia frente a contingencias en el *Terminal Monteverde*, huelgas de transporte o picos transitorios de demanda por sobre la carga nominal. Resulta imperativo reconocer que al extender la autonomía, se incrementa proporcionalmente el CAPEX (acero del recipiente), el capital inmovilizado en el inventario físico y, sustancialmente, los requerimientos de distanciamiento normativo por concentración de inventarios peligrosos.

## **3.2.2 Criterios de Implantación Física e Ingeniería Segura**

### **3.2.2.1 Sistema de Vaporización Forzada**

La ingeniería de este componente margina el consumo histórico promedio (205,18 lb/h) y orienta su dimensionamiento exclusivamente hacia el pico térmico absoluto de las calderas (809,11 lb/h).

Si se simulara la adquisición de un vaporizador comercial de placa de 1.000 lb/h, la holgura de diseño operaría bajo el siguiente margen mecánico ( $M$ ):

$$M = \frac{1.000 - 809,11}{809,11} \times 100 = 23,59 \%$$

Con un factor de *over-design* del 23,6 %, la selección de 1.000 lb/h rubrica un margen confiable como cota de preingeniería. Sin embargo, su aprobación para orden de compra estará condicionada a la validación empírica del *Turndown Ratio* (rango de modulación), la demanda eléctrica para resistores sumergidos, y su compatibilidad intrínseca con el control de las válvulas de cierre del quemador.

Se rechaza de manera explícita la vaporización natural (la absorción de calor atmosférico por medio del cilindro metálico) como el sistema principal de suministro. Este método pasivo se descarta como fundamento de diseño debido a que su tasa de entrega de gas se desploma en función del nivel del líquido, la temperatura atmosférica y los choques en la demanda estocástica del procedimiento, esto podría causar problemas ocasionados por el congelamiento de la línea si hay una rápida aspiración de 809 lb/h.

### 3.2.2.2 Consumo eléctrico del vaporizador

El impacto monetario del vaporizador eléctrico en el OPEX debe parametrizarse analíticamente bajo la ecuación:

$$E_{\text{vap,año}} = P_{\text{vap}} \times H_{\text{vap}} \times FC_{\text{vap}}$$

Donde  $P_{\text{vap}}$  es la demanda eléctrica (kW),  $H_{\text{vap}}$  las horas del ciclo operativo, y  $FC_{\text{vap}}$  el régimen de modulación.

El cargo anual devengado se monetizará cruzando estos kW contra el pliego tarifario ( $T_{\text{elec}}$ ):

$$C_{\text{vap}} = E_{\text{vap,año}} \times T_{\text{elec}}$$

En observancia de los lineamientos metodológicos expuestos, este costo no se asume como cero; se reporta como "parámetro contable pendiente" hasta que el *Data Sheet* oficial del fabricante lo transparente.

### 3.2.2.3 Tren de regulación y dimensionamiento de línea

El esquema conceptual (*Process Flow Diagram*) proyecta un lazo constituido por: válvula principal de raíz (líquido), filtro colador tipo Y, vaporizador de contacto indirecto, primera fase de regulación (reducción a presión intermedia), segunda etapa (reducción a presión de quemador), y un ensamble de seguridad que incluye detectores de límite bajo/alto (LAL/LAH), purgas y Válvulas de Cierre Rápido Automático (SDV o *Shut-down Valves*).

El diámetro final de interconexión (piping) no se determina en el alcance de este trabajo, la mecánica de fluidos incompresible exige que el cálculo del diámetro nominal ( $DN$ )

incorpore la longitud equivalente por accesorios ( $L_e$ ), el delta de caída de presión admisible ( $\Delta P$ ), la velocidad límite del fluido y la cedencia (*schedule*) del acero al carbón (ASTM A106 Gr B), estas iteraciones son parte del ciclo de ingeniería detallada, que va más allá de los objetivos del caso de referencia actual.

### 3.2.2.4 Emplazamiento, presiones y seguridad contra incendios

Las presiones operacionales definitivas estarán dictaminadas por la carta termodinámica de presión de vapor del GLP comercial y el *setpoint* exigido por el proveedor del quemador, esta tesis omite deliberadamente la asunción de rangos ficticios (como la conjetura 5-10 psi) y deja sentada la necesidad de un *skid* de regulación progresiva.

Respecto a la implantación física de las balas, la validación de distancias normativas de amortiguación (hacia vías, linderos y líneas de alta tensión) es irrealizable sin un plano topográfico (*plot plan*). Adicionalmente, el despliegue del sistema exigirá el diseño de un anillo periférico contra incendio (*Fire & Gas*), dotado de detectores catalíticos o infrarrojos y válvulas de diluvio, por consiguiente, aunque el dimensionamiento matemático del tanque es impecable, se decreta que la factibilidad de la instalación espacial del mismo exige comprobación empírica contra la norma NFPA 58 aplicable al área real de la fábrica.

**Tabla 14.** *Dimensionamiento preliminar de ingeniería para el sistema GLP*

| Componente del Sistema | Parámetro de Diseño / Selección     | Valor de Pre-Ingeniería | Estado de la Especificación     |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Almacenamiento         | Demanda volumétrica diaria          | 728,48 gal/día          | Variable calculada.             |
| Almacenamiento         | Inventario de seguridad (autonomía) | 15 días                 | Axioma adoptado por el estudio. |
| Almacenamiento         | Reserva volumétrica útil            | 10.927,20 gal           | Variable calculada.             |

|                               |                                            |                   |                                                                  |
|-------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>Almacenamiento</b>         | Nivel máximo de seguridad (Ullage)         | 85 %              | Supuesto conservador (Límite termodinámico).                     |
| <b>Capacidad</b>              |                                            |                   |                                                                  |
| <b>Almacenamiento</b>         | <b>nominal de placa exigida</b>            | 12.855,53 gal     | Variable calculada.                                              |
| <b>Arreglo de Recipientes</b> | Configuración geométrica total             | $\geq 12.900$ gal | Condicionado a la matriz comercial de proveedores.               |
| <b>Tren de Vaporización</b>   | Demanda media del proceso                  | 205,18 lb/h       | Variable calculada.                                              |
| <b>Tren de Vaporización</b>   | <b>Caudal de arrastre máximo (Diseño)</b>  | 809,11 lb/h       | Variable calculada.                                              |
| <b>Tren de Vaporización</b>   | Capacidad del equipo referencial           | 1.000 lb/h        | Selección preliminar técnica.                                    |
| <b>Tren de Vaporización</b>   | Factor de seguridad ( <i>Over-design</i> ) | 23,59 %           | Variable calculada (Rango aceptable).                            |
| <b>Red de interconexión</b>   | Diámetro nominal del <i>Piping</i>         | No determinado    | Sujeto a la isometría y mecánica de fluidos final.               |
| <b>Red de interconexión</b>   | Reguladores y presión del anillo           | No determinados   | Dependientes de la calibración del quemador dual/GLP.            |
| <b>Layout / Civil</b>         | Distancias de amortiguación (NFPA)         | No determinadas   | Sujetas a levantamiento topográfico de la parcela.               |
| <b>Costo Operativo</b>        | Consumo eléctrico auxiliar (kWh/año)       | No determinado    | Exige <i>Data Sheet</i> eléctrico del vaporizador de 1.000 lb/h. |

*Nota. Las magnitudes presentadas son representativas de una fase de preingeniería conceptual. La etapa de construcción requerirá, sin lugar a dudas, memorias de cálculo aprobadas (isometría, hidráulica), análisis HAZOP y la emisión de permisos para la construcción por parte de las autoridades competentes.*

### 3.3 Proyección de Mitigación Ambiental

La estimación del impacto ambiental inherente al *fuel switch* (cambio de combustible) se vertebra sobre la inmutabilidad de la demanda de energía térmica útil del proceso. La proyección de emisiones directas de dióxido de carbono (huella de carbono de alcance 1) se cuantificó relacionando la tasa anual de energía primaria suministrada por cada hidrocarburo contra sus respectivos factores de emisión estandarizados (IPCC, 2006).

Para los cálculos de combustión estacionaria se adoptaron las siguientes constantes predeterminadas (IPCC, 2006):

$$FE_{Búnker} = 77.400 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{TJ}}$$

$$FE_{GLP} = 63.100 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{TJ}}$$

*Nota: Si durante la eventual ejecución del proyecto el Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador publica factores de emisión país homologados, estas constantes teóricas deberán actualizarse.*

#### 3.3.1 Cuantificación de Emisiones: Línea Base con Búnker C

Retomando el volumen de consumo de Búnker C anualizado:

$$V_{B, año} = 540 \frac{\text{gal}}{\text{día}} \times 300 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 162.000 \text{ gal/año}$$

Y afectándolo por la concentración energética calculada por galón (151,40 MJ/gal), la energía térmica bruta liberada en el hogar asciende a:

$$E_{B, año} = 162.000 \text{ gal/año} \times 151,40 \text{ MJ/gal} = 24.526.800 \text{ MJ/año}$$

Para compatibilizar con las unidades del IPCC, se escala el calor total a Tera julios (1 TJ = 10<sup>6</sup> MJ):

$$E_{B, año} = 24,5268 \text{ TJ/año}$$

El inventario directo de emisiones resulta de aplicar el factor correspondiente:

$$CO_{2,B} = 24,5268 \text{ TJ/año} \times 77.400 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{TJ}}$$

$$CO_{2,B} = 1.898.374,32 \text{ kg CO}_2/\text{año}$$

Que en unidades toneladas se consolida en:

$$CO_{2,B} \approx 1.898,37 \text{ t CO}_2/\text{año}$$

### 3.3.2 Cuantificación de Emisiones: Escenario Proyectado con GLP

Ejecutando el mismo algoritmo bajo el consumo másico proyectado de gas:

$$m_{GLP, año} = 1.489,12 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 300 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 446.736 \text{ kg/año}$$

Afectado por el Poder Calorífico Inferior del GLP (47,3 MJ/kg):

$$E_{GLP, año} = 446.736 \text{ kg/año} \times 47,3 \text{ MJ/kg} = 21.131.612,8 \text{ MJ/año}$$

Escalado a Tera julios:

$$E_{GLP, año} = 21,1316 \text{ TJ/año}$$

El inventario de emisiones post reconversión proyecta un valor de:

$$CO_{2,GLP} = 21,1316 \text{ TJ/año} \times 63.100 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{TJ}}$$

$$CO_{2,GLP} = 1.333.403,96 \text{ kg CO}_2/\text{año}$$

O su equivalente métrico:

$$CO_{2,GLP} \approx 1.333,40 \text{ t CO}_2/\text{año}$$

### 3.3.3 Reducción de la Huella de Carbono y Variación Porcentual

La mitigación teórica de gases de efecto invernadero imputable al proyecto es la sustracción directa entre ambos perfiles térmicos:

$$\text{Reducción} = CO_{2,B} - CO_{2,GLP}$$

$$\text{Reducción} = 1.898,37 - 1.333,40$$

$$\text{Reducción} \approx 565,0 \text{ t CO}_2/\text{año}$$

El factor de abatimiento porcentual se evalúa respecto a la línea base inercial:

$$\text{Reducción \%} = \left( \frac{564,97}{1.898,37} \right) \times 100 \approx 29,76 \%$$

|                                                |
|------------------------------------------------|
| <b>Reducción % <math>\approx</math> 29,8 %</b> |
|------------------------------------------------|

La disminución de aproximadamente el 30 % en las emisiones directas no se debe a un solo fenómeno, sino que tiene su origen en una sinergia termoquímica doble:

1. **Menor intensidad de carbono:** El GLP tiene una relación hidrógeno-carbono (H/C) más alta, lo que implica que el factor de emisión de CO<sub>2</sub> por cada unidad de entalpía liberada es menor (63.100 en lugar de 77.400).
2. **Optimización del rendimiento termodinámico:** La quema de gas, con una eficiencia global proyectada del 86,5 % (en comparación con el 74,5 % del Búnker), necesita un flujo bruto de energía de entrada que es menor para entregar el mismo volumen de calor latente al vapor.

**Tabla 15.** Comparación de emisiones directas de CO<sub>2</sub> entre los escenarios

| Indicador Termo-ambiental              | Línea Base Operativa<br>(Búnker C) | Escenario Proyectado<br>(GLP)   |
|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Demanda volumétrica/másica</b>      | 162.000 gal/año                    | 446.736 kg/año                  |
| <b>Carga de Energía de entrada</b>     | 24,5268 TJ/año                     | 21,1316 TJ/año                  |
| <b>Factor de Emisión (IPCC)</b>        | 77.400 kg CO <sub>2</sub> /TJ      | 63.100 kg CO <sub>2</sub> /TJ   |
| <b>Emisiones Directas Anuales</b>      | 1.898,37 t CO <sub>2</sub> /año    | 1.333,40 t CO <sub>2</sub> /año |
| <b>Atenuación Anual Proyectada</b>     | —                                  | –564,97 t CO <sub>2</sub> /año  |
| <b>Factor de Mitigación Porcentual</b> | —                                  | <b>29,76 %</b>                  |

*Nota. El cálculo tabulado refleja puramente el inventario de CO<sub>2</sub> estequiométrico por reacción en la fuente (Alcance 1). Por rigor metodológico, la cifra no se expresa en CO<sub>2eq</sub> (equivalente) pues omite la modelación de trazas de metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nítrico (N<sub>2</sub>O). Se desestiman las emisiones organizacionales por fletes terrestres, importación de GLP o la manufactura e instalación (capex carbon) de la nueva infraestructura presurizada.*

### **3.3.4 Comportamiento Projectado de Otros Contaminantes Atmosféricos**

De cara al cumplimiento normativo nacional (TULSMA), el diagnóstico ambiental trasciende el CO<sub>2</sub> para perfilar las emisiones tóxicas locales:

#### **3.3.4.1 Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>):**

El escenario gasífero garantiza un colapso exponencial en el potencial de emisión de SO<sub>2</sub> al carecer de la matriz sulfurada constitutiva del residual pesado. Sin embargo, para blindar la probidad de la tesis, se rechaza asignar una concentración específica de abatimiento (mg/Nm<sup>3</sup>) en ausencia de ensayos de laboratorio del Búnker C, balances másicos de azufre y normalización de caudales de escape por exceso de aire. La magnitud exacta de mitigación aguardará la contrastación de la ficha técnica final del distribuidor y los monitoreos ambientales aplicables.

#### **3.3.4.2 Material particulado (PM) y Opacidad:**

La transición erradica la inyección de cenizas inorgánicas al hogar y coarta la aglomeración de asfáltenos pesados (hollín), por lo que se prefigura un abatimiento agudo del material particulado primario. En consecuencia colateral, la opacidad óptica de la pluma descenderá drásticamente. Al carecer de modelaciones de deposición o factores EPA AP-42 parametrizados a la geometría del caldero de Manta, este trabajo se abstiene de afirmar que la opacidad será idéntica a "cero", difiriendo su convalidación hasta el levantamiento de un muestreo isocinético.

#### **3.3.4.3 Óxidos de nitrógeno (NOx) y Monóxido de carbono (CO):**

Constituye un error termodinámico sentenciar que el GLP reducirá automáticamente el inventario de NOx y CO, aunque el suministro en fase gaseosa ayuda a homogeneizar el

aire comburente y reduce teóricamente el monóxido de carbono, una calibración incorrecta del circuito de control (Air-Fuel Ratio) continuará causando episodios de inquemados. Además, el GLP produce temperaturas de llama adiabática localizadas mucho más altas que el Búnker C, lo que podría provocar un disparo reactivo de Thermal NOx, la geometría del quemador (por ejemplo, Low – Nox Bunnners con recirculación de gases - FGR) y su adecuada sintonización en el lugar son las responsables absolutas de su abatimiento.

#### **3.3.4.4 Comparación Normativa y Cierre del Apartado Ambiental**

La arquitectura comparativa desarrollada evidencia que el escenario con GLP es ambientalmente favorable y coadyuva decisivamente al control de emisiones de la planta. No obstante, la confrontación de esta proyección teórica frente al marco punitivo de la legislación ecuatoriana mantiene una tipificación de "evaluación preliminar".

Este documento de tesis desautoriza expresamente cualquier interpretación que asuma la conformidad legal o el licenciamiento ambiental automático del caldero propuesto. El dictamen definitivo de cumplimiento es prerrogativa exclusiva de la autoridad de control local, previa caracterización del *vintage* de la fuente, homologación del porcentaje de O<sub>2</sub> en base seca y ejecución de pruebas metrológicas trazables en campo.

### **3.4 Evaluación Financiera y Costo de Ciclo de Vida (LCC)**

El análisis financiero del proyecto se organiza a través de un flujo de caja incremental proyectado por diez años. Este estudio considera únicamente los costos y beneficios diferenciales entre la situación actual (escenario de línea base con Búnker C) y el planteamiento de reconversión a GLP.

Esta investigación utiliza una evaluación financiera incremental con enfoque de ciclo de vida debido a la falta de registros minuciosos sobre mantenimiento, revisiones, consumo eléctrico específico del vaporizador, pólizas de seguro y valor residual del activo, este enfoque es, por definición, conservador y preliminar; los resultados obtenidos deberán ser validados con cotizaciones de mercado y condiciones particulares de planta antes de cualquier ejecución presupuestaria.

### 3.4.1 Estructura de Capital (CAPEX)

La inversión inicial se cifra en USD 145.000, utilizando este presupuesto como techo referencial para la estimación financiera.

**Tabla 16.** Estructura de inversión referencial del sistema de reconversión

| Componente del Proyecto                                | Valor Referencial (USD) |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| Quemadores modulantes y adecuación electromecánica     | 48.000                  |
| Estación de almacenamiento, obra civil y contención    | 62.000                  |
| Vaporizador, tren de regulación y seguridad industrial | 23.000                  |
| Ingeniería de detalle, pruebas y permisos              | 12.000                  |
| <b>Total CAPEX referencial</b>                         | <b>145.000</b>          |

*Nota. Los montos constituyen una estimación de ingeniería conceptual. La capacidad de almacenamiento debe redimensionarse a un mínimo de 12.900 galones (capacidad agua). El presupuesto excluye rubros por contingencias y costo financiero del apalancamiento.*

### 3.4.2 Optimización Operativa (OPEX) e Indicadores de Rentabilidad

#### Costo anual de la línea base (Búnker C)

El consumo anual de combustible residual se determina mediante:

$$V_{B,año} = 540 \frac{\text{gal}}{\text{día}} \times 300 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 162.000 \text{ gal/año}$$

El gasto anual directo por concepto de combustible asciende a:

$$C_{B,año} = V_{B,año} \times P_B = 162.000 \text{ gal/año} \times 1,952285 \text{ USD/gal}$$

$$C_{B,año} \approx 316.270,17 \text{ USD/año}$$

Complementariamente, el gasto anual en aditivos químicos para dispersión de lodos se calcula en:

$$C_{\text{aditivos}} = 350 \frac{\text{USD}}{\text{mes}} \times 12 \text{ meses/año} = 4.200 \text{ USD/año}$$

El OPEX cuantificable mínimo de la línea base resulta en:

$$OPEX_{B,\text{cuantificable}} = 320.470,17 \text{ USD/año}$$

### 3.4.2.1 Costo anual del escenario proyectado (GLP)

Utilizando el requerimiento anual másico proyectado para la planta (446.736 kg/año) y la tarifa industrial referencial:

$$C_{GLP} = 446.736 \text{ kg/año} \times 0,862504 \text{ USD/kg}$$

$$C_{GLP} = 385.311,59 \text{ USD/año}$$

Nota: Este valor representa el costo directo del energético. No se han incorporado rubros por consumo eléctrico del vaporizador ni mantenimiento preventivo, por lo que constituye el suelo (costo mínimo) del escenario propuesto.

### 3.4.2.2 Flujo de caja incremental (FNE)

El flujo neto incremental se define por la variación entre los OPEX de ambos escenarios:

$$FNE = OPEX_B - OPEX_{GLP}$$

$$FNE = 320.470,17 - 385.311,59$$

$$FNE = -64.841,42 \text{ USD/año}$$

El signo negativo corrobora que, bajo el escenario tarifario base, la reconversión incurre en un sobre costo anual operativo de aproximadamente USD 64.841,42.

**Tabla 17.** Flujo de caja incremental proyectado (escenario base)

| Año  | CAPEX (USD) | Flujo Operativo (USD) | Flujo Neto (USD) |
|------|-------------|-----------------------|------------------|
| 0    | -145.000,00 | 0,00                  | -145.000,00      |
| 1-10 | 0,00        | -64.841,42            | -64.841,42       |

*Nota. Valores expresados en dólares constantes. El escenario excluye electricidad auxiliar y costos indirectos ante la falta de evidencia documental.*

### 3.4.2.3 Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)

Utilizando una Tasa Mínima Atractiva de Retorno (TMAR) del 12 % y un horizonte de  $n = 10$  años:

$$VAN = -I_0 + FNE \left[ \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \right]$$

$$VAN = -145.000 + (-64.841,42) \left[ \frac{1 - (1,12)^{-10}}{0,12} \right]$$

$$VAN = -511.368,47 \text{ USD}$$

Debido a que el flujo incremental es permanentemente negativo, el proyecto carece de una TIR económica interpretable dentro de los números reales. De igual forma, el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) resulta **no alcanzado** durante el horizonte de evaluación.

#### 3.4.2.4 Análisis de Sensibilidad de Punto de Equilibrio

El proyecto requiere una mejora sustancial en sus flujos para neutralizar el VAN. El beneficio incremental anual necesario (flujo de equilibrio) para cubrir el CAPEX y la TMAR es:

$$FNE_{\text{equilibrio}} = \frac{145.000}{\left[ \frac{1 - (1,12)^{-10}}{0,12} \right]} = 25.662,70 \text{ USD/año}$$

Para lograr este flujo positivo, el proyecto debe generar un ahorro operativo neto acumulado frente a la línea base de aproximadamente USD 90.504 anuales (64.841,42 + 25.662,70).

**Tabla 18. Sensibilidad de la viabilidad económica**

| Escenario de Sensibilidad    | Precio GLP (USD/kg) | Resultado (VAN)      |
|------------------------------|---------------------|----------------------|
| <b>Base</b>                  | 0,8625              | Negativo (Inviabile) |
| <b>GLP -10%</b>              | 0,7763              | Negativo (Inviabile) |
| <b>GLP -20%</b>              | 0,6900              | Negativo (Inviabile) |
| <b>Equilibrio Financiero</b> | <b>0,6599</b>       | $VAN \approx 0$      |
| <b>GLP -25%</b>              | 0,6469              | Ligeramente Positivo |

#### 3.4.2.5 Conclusión Financiera

No es económicamente factible convertir la tecnología a GLP en el escenario tarifario base, ya que los costos operativos adicionales eliminan cualquier beneficio inercial del proyecto, para que la inversión sea redituable, el precio del GLP debería disminuir en casi un 24 % (hasta el límite de USD 0,66/kg), o la planta debería mostrar ahorros adicionales no previstos (de seguros, energía y mantenimiento) por encima de los USD 90.504 al año, se

aconseja que, al recibir presupuestos definitivos de la localidad, se replantee la viabilidad y se examine el efecto de suprimir los costos relacionados con el Búnker C (limpieza, aditivos, paradas).

### **3.5 Discusión de Resultados**

Los resultados del presente estudio evidencian que la sustitución de Búnker C por GLP no genera una respuesta simétrica en las dimensiones técnica, ambiental y económica. La modelación termodinámica ratifica que el GLP es capaz de satisfacer la demanda de energía útil del sistema de calderos de la planta atunera y mejorar el rendimiento global de la combustión; sin embargo, el análisis financiero demuestra que los costos de inversión (CAPEX) y la asimetría en el precio industrial de los combustibles impiden obtener una rentabilidad favorable bajo el escenario tarifario base, esta dicotomía confirma la importancia de tratar los proyectos de conversión desde un punto de vista sistémico, la mejora técnica es un requisito necesario, pero no suficiente, para conseguir una economía sostenible.

La línea base, que se estableció con un consumo diario de 540 galones de Búnker C y una eficiencia del 74,5%, mostró una producción promedio de vapor de 3.498 lb/h, este caudal equivale a un factor de carga del 25,35% en relación con la capacidad nominal del equipo, que es de 400 BHP, a pesar de que este valor indica que la capacidad instalada no se está utilizando en su totalidad, en la práctica industrial el sobredimensionamiento es una estrategia comúnmente empleada para satisfacer los picos de demanda del proceso de esterilización, sin embargo, este load factor reducido modifica la conducta de combustión y debe tenerse en cuenta a la hora de elegir la relación de modulación (turndown ratio) del quemador GLP nuevo, con el fin de prevenir interrupciones o inestabilidades en carga mínima.

Se estimó una eficiencia térmica de 86,5 % para el escenario con GLP, la ganancia de 12 puntos porcentuales es coherente con la literatura especializada y se debe a una dosificación más precisa del aire comburente y a la eliminación del fouling carbonoso en el haz tubular, es crucial que se aclare que este aumento no es una propiedad inherente del combustible, sino la consecuencia de una optimización de la estequiometría de la reacción,

para que se concrete empíricamente, será necesario calibrar con exactitud el lazo de control aire-gas y realizar un mantenimiento preventivo estricto; si no, una regulación inadecuada podría llevar a niveles de CO intolerables o incluso a un aumento de los NOx térmicos.

La comparación con la bibliografía previa muestra que, aunque Sagaf et al. (2020) validan el método indirecto (ASME PTC 4) para detectar pérdidas, extrapolar datos de centrales grandes (660 MW) a sistemas pirotubulares industriales (400 BHP) no tiene validez estadística, asimismo, aunque las investigaciones experimentales de Zhao et al. (2024) y Soliman et al. (2026) registran una disminución de contaminantes y un aumento de la estabilidad de llama en el uso de gases, sus descubrimientos no confirman un *fuel switch*, ya que los fenómenos de transporte en quemadores pequeños o co-combustión no reproducen la complejidad de un sistema que vaporiza GLP con gran caudal.

La discrepancia volumétrica es un descubrimiento crucial del modelo: a pesar de la eficiencia térmica superior, el GLP necesita más volumen total de almacenamiento para garantizar su autonomía durante 15 días, esto se debe a que su densidad física en estado líquido es menor, lo que supuso una necesidad mínima de 12.900 galones (capacidad agua), esta evaluación muestra que la logística de abastecimiento es un elemento que modifica la disposición física de la planta. Por ello, el diseño de la estación de almacenamiento no es un proceso abstracto, sino uno que depende estrictamente del layout (la distribución física) y de las distancias reglamentarias de seguridad.

En términos ambientales, la modificación de la matriz supone una disminución de 565,0 t CO<sub>2</sub>/año, lo que equivale a un recorte del 29,8 % con respecto a la línea base. Aunque el GLP reduce la intensidad en términos de carbono, el modelo es claro al calificar esta acción como una estrategia de transición energética y no como una descarbonización completa, la disminución de SO<sub>2</sub> y material particulado, a pesar de ser teóricamente evidente, sigue siendo una hipótesis técnica que debe confirmarse por medio de un monitoreo isocinético in situ después de la implementación, ya que la efectividad del sistema dependerá no solo de la pureza química del gas, sino también de la calidad de su combustión.

Para concluir, la evaluación financiera es el filtro principal de viabilidad, el proyecto muestra un desequilibrio estructural bajo los precios actuales, con un flujo neto anual negativo de USD 64.841,42 y un VAN de USD -511.368,47, a pesar de que financieramente es desalentador, tiene un gran valor analítico: muestra que para llegar al punto de equilibrio ( $VAN \approx 0$ ), el precio del GLP tendría que bajar a aproximadamente USD 0,66/kg o la planta tendría que registrar ahorros operativos adicionales por encima de los USD 90.000 al año.

En conclusión, el diagnóstico desmitifica la creencia de que la conversión a gas es una mejora automática, el estudio ofrece una base de decisión organizada en la que la técnica y la mitigación medioambiental respaldan la modernización; sin embargo, los precios imponen un obstáculo en términos de rentabilidad que debe ser manejado a través de incentivos, acuerdos tarifarios o reestructurando los costos básicos del mantenimiento y las paradas.

### **3.6 Matriz de Decisión Multicriterio (Evaluación Integral)**

La matriz de decisiones multicriterio, que se ideó con el objetivo de resumir el rendimiento relativo de las opciones bajo un conjunto de indicadores ambientales, financieros y técnicos, es la herramienta mediante la cual se realiza la evaluación integral del proyecto, esta herramienta analítica no sustituye un análisis jerárquico de procesos (AHP) altamente complejo, sino que funciona como un instrumento de síntesis ponderada para mostrar el trade-off entre la factibilidad económica y el rendimiento técnico-ambiental.

Dado que no se realizó una consulta técnica de especialistas para la determinación de pesos, estos fueron establecidos a través de un análisis interno de sensibilidad, otorgando a cada eje una importancia proporcional al peso relativo que aporta a la sostenibilidad industrial.

#### **Estructura de ponderación:**

- **Dimensión técnica (35 %):** Asegura la suficiencia operacional y la confiabilidad en el abastecimiento de vapor.
- **Dimensión Ambiental (30 %):** Representa la reducción de externalidades y la conformidad con las regulaciones actuales.

- **Dimensión Económica (35 %):** Analiza la solidez financiera y la rentabilidad de la inyección de capital (CAPEX).

Para la valoración, se emplea una escala *Likert* de cinco niveles: 1 (Crítico/Inviable), 2 (Desfavorable), 3 (Incertidumbre/No concluyente), 4 (Favorable) y 5 (Muy Favorable).

**Tabla 19.** Matriz de evaluación multicriterio ponderada: Búnker C frente a GLP

| Dimensión        | Variable de decisión                  | Peso Global | Score (Búnker C) | Score (GLP) | Fundamentación                                          |
|------------------|---------------------------------------|-------------|------------------|-------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Técnica</b>   | Satisfacción de la demanda térmica    | 10,50 %     | 4                | 4           | Ambos satisfacen la carga térmica modelada.             |
|                  |                                       |             |                  |             | 74,5 % vs 86,5 %                                        |
|                  | Eficiencia térmica                    | 8,75 %      | 3                | 5           | (Ventaja termodinámica del GLP).                        |
|                  | Acondicionamiento y operación         | 7,00 %      | 2                | 4           | Búnker requiere bombeo/atomización; GLP es gaseoso.     |
|                  | Mantenimiento y limpieza              | 5,25 %      | 2                | 4           | GLP suprime incrustaciones, reduciendo horas-hombre.    |
| <b>Ambiental</b> | Disponibilidad de infraestructura     | 3,50 %      | 5                | 2           | Búnker es la línea base; GLP requiere nueva obra civil. |
|                  | Emisiones directas de CO <sub>2</sub> | 10,50 %     | 2                | 4           | Proyección de mitigación del ~ 30 %.                    |

|                  |                                                     |         |   |   |                                                               |
|------------------|-----------------------------------------------------|---------|---|---|---------------------------------------------------------------|
| <b>Económica</b> | Potencial de SO <sub>2</sub> y Material Particulado | 9,00 %  | 2 | 5 | GLP elimina la matriz sulfurada y cenizas del residual.       |
|                  | NOx y CO                                            | 6,00 %  | 3 | 3 | Depende de la sintonización del quemador (indeterminado).     |
|                  | Cumplimiento normativo potencial                    | 4,50 %  | 2 | 4 | Expectativa favorable del gas, sujeta a medición.             |
|                  | Costo anual de combustible                          | 12,25 % | 5 | 2 | Búnker C es más económico en el escenario base.               |
|                  | Inversión inicial (CAPEX)                           | 8,75 %  | 5 | 1 | Búnker C ya está amortizado; GLP requiere USD 145.000.        |
|                  | Valor Actual Neto (VAN)                             | 7,00 %  | 4 | 1 | VAN negativo para GLP (USD – 511.368,47).                     |
|                  | TIR y Periodo de Recuperación                       | 3,50 %  | 4 | 1 | Inexistencia de TIR positiva y PRI > horizonte de evaluación. |
|                  | Resiliencia tarifaria y riesgo                      | 3,50 %  | 3 | 2 | Alta vulnerabilidad del GLP frente a precios internacionales. |

*Nota. Los puntajes representan una simulación basada en el escenario técnico-financiero del estudio y no constituyen una decisión comercial universal.*

### 3.6.1 Cálculo de los puntajes ponderados

El aporte ponderado de cada alternativa ( $P_i$ ) se obtiene normalizando el puntaje asignado ( $s_{ij}$ ) respecto a la escala máxima:

$$P_i = \sum \left( w_j \times \frac{s_{ij}}{5} \right)$$

- **Puntaje Integral Búnker C ( $P_B$ ):**

$$P_B \approx 69,95 \%$$

- **Puntaje Integral GLP ( $P_{GLP}$ ):**

$$P_{GLP} \approx 58,95 \%$$

#### 3.6.1.1 Interpretación de la evaluación multicriterio

Al desglosar los resultados por dimensiones, se observa que el escenario proyectado con GLP aventaja al Búnker C en el eje técnico-ambiental:

Técnica (GLP): 27,65 % > Técnica (Búnker): 22,05 %

Ambiental (GLP): 25,50 % > Ambiental (Búnker): 13,20 %

No obstante, la balanza se inclina drásticamente a favor de la línea base al integrar la dimensión económica:

Económica (Búnker): 34,70 % > Económica (GLP): 5,80 %

La magnitud de esta brecha confirma que, bajo el escenario tarifario y de CAPEX actual, los beneficios técnicos y la mitigación de emisiones no alcanzan a compensar el sobre costo financiero derivado de la reconversión. El resultado integral, favoreciendo al Búnker C (69,95 % frente a 58,95 %), ratifica que la sustitución es factible desde la ingeniería, pero financieramente inviable bajo las condiciones de mercado vigentes.

### 3.6.2 Análisis de robustez y sensibilidad

La jerarquización de alternativas es sensible a la ponderación que la gerencia asigne a cada dimensión. En un escenario donde se priorice la responsabilidad corporativa sobre la rentabilidad (escenario "Verde"), se podría elevar el peso de la dimensión ambiental al 50 %,

reduciendo la importancia económica. En dicho caso, la brecha entre ambos combustibles se estrecharía significativamente; sin embargo, incluso bajo esa premisa, se mantendría la necesidad imperativa de financiar la brecha negativa de flujo de caja que el proyecto exhibe actualmente. Por tanto, el estudio concluye que el GLP no representa una ventaja competitiva automática; su adopción es una decisión de inversión que debe ser supeditada a un rediseño de las condiciones tarifarias o a la obtención de subsidios/beneficios tributarios que permitan el cierre financiero del proyecto.

## Conclusiones

El desarrollo de la presente investigación permite extraer las siguientes conclusiones fundamentales, derivadas del rigor metodológico aplicado a la modelación técnica, ambiental y financiera del sistema de generación de vapor objeto de estudio.

**Diagnóstico de la línea base operativa:** El levantamiento técnico de la línea base permitió configurar un *benchmark* inercial para el parque de calderos pirotubulares. Bajo un régimen de dos turnos de 16 horas diarias, 300 días al año, se determinó una demanda de energía útil de 3.806,76 MJ/h. Se constató que la capacidad nominal de 400 BHP (13.800 lb/h) representa un techo térmico de diseño, mientras que la producción efectiva promedio es de 3.498 lb/h, situando el factor de carga en un 25,35 %. Esta ineficiencia de carga, sumada a las 80 horas-equipos mensuales dedicadas al mantenimiento por ensuciamiento (*fouling*), confirma la existencia de brechas operativas en el régimen actual con Búnker C.

**Desempeño térmico proyectado con GLP:** La reconversión hacia GLP proyecta un incremento de doce puntos porcentuales en la eficiencia térmica global, elevándola al 86,5 %, esta mejora, que se basa en la optimización estequiométrica de la combustión y la eliminación de incrustaciones, posibilita satisfacer la necesidad de energía útil con un flujo másico de 93,07 kg/h, sin embargo, como es una modelación prospectiva, la veracidad de este rendimiento depende de la calidad de la sincronización del quemador, el mantenimiento preventivo riguroso después de la implementación y la capacidad del equipo para modular (*turndown*).

**Dimensionamiento de la infraestructura:** La factibilidad técnica del proyecto exige la habilitación de un parque de almacenamiento con una capacidad nominal mínima de 12.900 galones (capacidad agua), a fin de garantizar una autonomía operativa de quince días. Un tanque de 12.000 galones resultaría insuficiente al arrojar solo catorce días de inventario, contraviniendo el criterio de seguridad estratégica adoptado, el sistema de vaporización forzada se dimensionó en 1.000 lb/h, lo que proporciona un margen operativo del 23,6 %

respecto al flujo máximo teórico del caldero (809,11 lb/h), garantizando así la disponibilidad de gas durante los picos de demanda del procedimiento.

**Evaluación de la huella ambiental:** Se prevé que la sustitución de energía reduzca las emisiones de 564,97 toneladas de CO<sub>2</sub> por año, lo que representa una disminución del 29,76 % en comparación con la línea base, esta reducción de la emisión del GLP se debe a la sinergia entre el menor factor de emisión y una mayor eficiencia en la transferencia térmica del caldero, aunque las condiciones son ambientalmente favorables, esto no significa que el proceso esté completamente descarbonizado ni que tenga una certificación legal *a priori*, para la validación analítica de la mitigación de SO<sub>2</sub> y material particulado, se requiere monitoreos isocinéticos in situ después del comisionamiento, a pesar de que teóricamente el gas es limpio.

**Factibilidad económica:** La evaluación financiera muestra que el proyecto no es factible económicamente en el escenario tarifario y de inversión base, ya que los costos operativos del GLP (USD 385.311,59/año) exceden a los gastos mensurables de la línea base (USD 320.470,17/año), como resultado, el proyecto presenta un valor actual neto (VAN) de USD -511.368,47 y un flujo incremental negativo anual de USD -64.841,42; por lo tanto, no se logra un retorno positivo de la tasa interna de retorno (TIR) ni una recuperación de la inversión (PRI) durante el periodo de diez años, la viabilidad económica solo se lograría si el precio de mercado del GLP disminuye drásticamente (hasta USD 0,66 por kilogramo) o si se demuestran ahorros operativos excepcionales por encima de USD 90.504 al año.

**Contrastación de hipótesis:** La hipótesis de investigación se acepta parcialmente; se confirma la viabilidad técnica preliminar y el beneficio ambiental previsto, pero no en términos económicos, ya que, bajo las circunstancias actuales, los ahorros operativos no son capaces de cubrir el CAPEX, la matriz multicriterio determina que la reconversión tecnológica es un proyecto de ingeniería viable; sin embargo, financieramente no se recomienda.

**Alcance y limitaciones:** Los resultados se restringen a un estudio de caso referencial fundamentado en datos agrupados y no son una auditoría verificada, las conclusiones son concretas para el escenario térmico modelado y no pueden extenderse a otras plantas de

atún del cantón Manta, ya que sus disposiciones, contratos, *layout* espacial y necesidades de vapor pueden variar significativamente.

Como conclusión general, se declara explícitamente que, a pesar de que la propuesta demuestra factibilidad técnica de diseño y la evaluación ambiental refleja una disminución teórica significativa de emisiones, el proyecto NO es económicamente viable en el escenario tarifario actual, arrojando un VAN negativo de -\$511.368,47 USD bajo la tarifa base. Por ende, su implementación inmediata no es recomendable desde la perspectiva financiera, condicionando estrictamente su factibilidad futura a la obtención de subsidios, variaciones favorables en los precios de los combustibles, o a la monetización de externalidades no monetizadas.

## Recomendaciones

A partir de la valoración técnica, ambiental y económica realizada, se sugieren las pautas siguientes para los equipos de ingeniería y la gerencia de la planta con el objetivo de preparar el terreno para una posible transición energética y mejorar la gestión térmica actual.

### Fortalecimiento de la trazabilidad y registro operativo

Para disminuir la dependencia de los parámetros de referencia, es esencial sistematizar la recolección de datos operativos en la línea base. Se aconseja:

- **Implementación de un sistema de registro técnico:** Registrar por turno y equipo la presión de vapor, las temperaturas de alimentación y gases de escape, la concentración de O<sub>2</sub>, el tiempo de marcha y los flujos de combustible es esencial para poder determinar la eficiencia efectiva usando el método indirecto ASME PTC 4, esto se logra reemplazando los supuestos del modelo.
- **Levantamiento de la curva de demanda:** Describir el comportamiento horario del consumo de vapor en los procesos de esterilización y cocción; esto va a hacer posible verificar si la capacidad del sistema está sobreestimada o si el 25,35 % de factor de carga es una respuesta técnica apropiada a las fluctuaciones productivas.
- **Monitoreo energético y mantenimiento:** Desglosar los costos de mantenimiento (mano de obra, repuestos, servicios externos y disposición de desechos) y medir la cantidad neta de electricidad utilizada por el tren de precalentamiento, sin esta contabilidad analítica, el OPEX es una estimación conservadora y parcial.

### Optimización de la combustión previa a la reconversión

Para optimizar el rendimiento con Búnker C, se aconseja implementar acciones de optimización "de bajo costo" en la infraestructura existente antes de invertir capital en una sustitución:

- **Auditoría de combustión:** Asegurar la temperatura de consigna del combustible, comprobar que las boquillas de atomización estén en buen estado y regular la proporción entre aire y combustible.

- **Gestión del ensuciamiento (*Fouling*):** Establecer limpiezas mecánicas en función del seguimiento de la temperatura de la chimenea (si el gradiente sobrepasa los valores establecidos, la resistencia térmica por depósitos es crítica).
- **Evaluación de tecnologías complementarias:** Antes de pasar al GLP, se deben analizar acciones como la mejora de trampas de vapor, el perfeccionamiento del aislamiento térmico en las tuberías, la instalación de economizadores y la puesta en marcha de sistemas automáticos para controlar el oxígeno (O<sub>2</sub>).

### **Readiness Técnica y Pre-Inversión (Fase Pre-FEED)**

Si se quiere avanzar hacia la transición energética, la ingeniería tiene que pasar de la etapa conceptual a la de diseño básico ampliado (Pre-FEED):

- **Ingeniería de detalle:** Elaborar los planos as-built de instalación, determinando la disposición del tanque (de acuerdo con NFPA 58), el trazado de las tuberías (piping), la ubicación del vaporizador y la estructura del anillo contra incendios.
- **Validación de seguridad:** Realizar un análisis de riesgos (HAZOP) para detectar puntos donde haya fallas catastróficas (fugas, BLEVE, sobrepresión) y establecer la estrategia para implementar la seguridad en el instrumento (SDV).
- **Selección técnica vinculante:** Para reemplazar el CAPEX de referencia de 145,000 USD, se deben conseguir cotizaciones con detalles comerciales (certificados de cumplimiento, potencia de los vaporizadores, relación entre la reducción y la capacidad del quemador).
- **Pruebas piloto:** Antes de la reconversión total, confirmar que el quemador elegido tiene un comportamiento estequiométrico correcto a través de una prueba temporal en una de las cinco unidades o mediante una prueba de aceptación en fábrica (FAT), comprobando que la llama se encuentra estable y que las emisiones han disminuido.

### **Estrategia financiera y análisis de sensibilidad**

Se aconseja, debido a la falta de viabilidad económica en el escenario básico (VAN negativo),

- **Suspensión de la ejecución física:** No aprobar la inversión hasta que las condiciones tarifarias actuales se mantengan, dado que el proyecto no recupera el costo de capital requerido.
- **Análisis de sensibilidad dinámica:** Actualizar el modelo financiero después de cada boletín de precios emitido por EP Petroecuador, el proyecto llega a la rentabilidad solo si el costo del GLP baja hasta USD 0,66 por kilogramo o si se registran ahorros netos operativos anuales que superen los USD 90.504.
- **Gestión de beneficios:** Indagar sobre la posibilidad de obtener incentivos fiscales, créditos ecológicos o acuerdos tarifarios especiales que hagan posible el cierre de la brecha financiera identificada.

### **Verificación normativa**

El Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULSMA) debe ser seguido rigurosamente en cualquier cambio realizado al sistema de combustión. Se aconseja:

- **Monitoreo isocinético:** Organizar una campaña para medir contaminantes (SO<sub>2</sub>, PM, NOx, CO) por un laboratorio autorizado por el OAE, antes de la implementación y después de esta.
- **Estratificación:** Para determinar el límite de emisión específico que la autoridad requerirá al nuevo sistema, es necesario clasificar las calderas por su potencia y fecha de autorización.

### **Priorización de acciones**

- **Prioridad 1 (Inmediata):** Para mejorar el consumo de Búnker C, es necesario organizar el registro de datos operativos y hacer la conservación correctiva del sistema de combustión existente.
- **Prioridad 2 (Pre-inversión):** Desarrollar la ingeniería de detalle y obtener cotizaciones vinculantes solo si el diferencial tarifario se ajusta a los precios de equilibrio calculados.

- **Prioridad 3 (Regulatoria):** Gestionar la actualización de los monitoreos ambientales y validar con la autoridad competente los requisitos para la modificación del permiso de operación industrial ante un eventual cambio de combustible.

## Bibliografía

- American Society of Mechanical Engineers. (2013). *Performance test codes for fired steam generators (ASME PTC 4-2013)*. ASME. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/fired-steam-generators>
- Arias, F. G. (2012). *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica* (6.<sup>a</sup> ed.). Editorial Episteme.
- Asamblea Constituyente del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Registro Oficial No. 449. <https://www.asambleanacional.gob.ec/es/contenido/constitucion-de-la-republica-del-ecuador>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. Registro Oficial Suplemento No. 983. <https://sustanciasyresiduos.ambiente.gob.ec/producto/codigo-organico-del-ambiente/>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2019). *Ley Orgánica de Eficiencia Energética*. Registro Oficial Suplemento No. 449. <https://www.asambleanacional.gob.ec/>
- Bernal, C. A. (2010). *Metodología de la investigación: Administración, economía, humanidades y ciencias sociales* (3.<sup>a</sup> ed.). Pearson Educación.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Termodinámica* (9.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education.
- Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador EP Petroecuador. (2024). *Precios de venta en terminal para las comercializadoras calificadas y autorizadas a nivel nacional: Del 12 de diciembre de 2024 al 11 de enero de 2025*. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/2024/12/ESTRUCTURA-DE-PRECIOS-DICIEMBRE-2024.pdf>
- Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador EP Petroecuador. (2025a). *Precios de venta en terminal para las comercializadoras calificadas y autorizadas a nivel nacional: Del*

12 de mayo al 11 de junio de 2025. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/2025/05/ESTRUCTURA-DE-PRECIOS-MAYO-2025.pdf>

Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador EP Petroecuador. (2025b). *Precios de venta en terminal para las comercializadoras calificadas y autorizadas a nivel nacional: Del 12 de octubre al 11 de noviembre de 2025*. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/2025/10/ESTRUCTURA-DE-PRECIOS-OCTUBRE-2025.pdf>

Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador EP Petroecuador. (2026a). *Precios de venta en terminal para las comercializadoras calificadas y autorizadas a nivel nacional: Del 12 de abril al 11 de mayo de 2026*. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/2026/04/ESTRUCTURA-DE-PRECIOS-DEL-12-DE-ABRIL-AL-11-DE-MAYO-DE-2026.pdf>

Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador EP Petroecuador. (2026b). *Precios de venta en terminal para las comercializadoras calificadas y autorizadas a nivel nacional: Del 12 de mayo al 11 de junio de 2026*. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/2026/05/ESTRUCTURA-DE-PRECIOS-DEL-12-DE-MAYO-AL-11-DE-JUNIO-DE-2026.pdf>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 2, Energy*. Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

Jaens Parra, J. J., & Chalen Arana, J. A. (2024). *Propuesta de optimización de sistemas de calor a través de la conversión de calderas industriales de diésel a gas licuado de petróleo* [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28963>

- Méndez Álvarez, C. E. (2011). *Metodología: Diseño y desarrollo del proceso de investigación con énfasis en ciencias empresariales* (4.<sup>a</sup> ed.). Limusa.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Acuerdo Ministerial No. 097-A: Refórmese el Texto Unificado de Legislación Secundaria*. Registro Oficial, Edición Especial No. 387.  
<https://www.registroficial.gob.ec/edicion-especial-no-387-10/>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2024). *Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional de Ecuador 2026–2035*. Registro Nacional de Cambio Climático. <https://rncc.ambiente.gob.ec/rncc/contribucion-determinada-a-nivel-nacional-ndc/>
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- National Fire Protection Association. (2023). *NFPA 85: Boiler and combustion systems hazards code*. <https://link.nfpa.org/all-publications/85/2023>
- National Fire Protection Association. (2024a). *NFPA 54: National fuel gas code*. <https://link.nfpa.org/all-publications/54/2024>
- National Fire Protection Association. (2024b). *NFPA 58: Liquefied petroleum gas code*. <https://link.nfpa.org/all-publications/58/2024>
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>
- Saa Zambrano, D. J., & Valero Pérez, F. D. (2024). *Análisis comparativo de combustibles diésel y GLP para la generación de vapor mediante costo operativo en una planta productora de alimento balanceado* [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica

<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27512>

Sagaf, M., Alim, S., Wibisono, C., & Muzakki, A. (2020). Predicting boiler efficiency deterioration using energy balance method: Case study in 660 MW power plant Jepara, Central Java, Indonesia. *Journal of Thermal Engineering*, 6(6), 247–256.  
<https://doi.org/10.18186/thermal.821052>

Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2010). *Gas licuado de petróleo. Requisitos (NTE INEN 675)*.

Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2012). *Instalaciones de gases combustibles para uso residencial, comercial e industrial. Requisitos (NTE INEN 2260)*.

Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2015). *Tanques para gases a baja presión. Requisitos e inspección (NTE INEN 2261)*.

Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2017). *Modificatoria 2 del RTE INEN 008 (3R): Tanques y cilindros de acero soldados para gas licuado de petróleo y sus conjuntos técnicos*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/reglamentos/M2-RTE-008-3R.pdf>

Soliman, K. M., Mater, E. O., Moneib, H. A., & Abdulnaim, A. M. (2026). Optimization of thermal and combustion performance for diesel-LPG cofiring in a novel double swirl burner. *Fuel*, 404, 136258. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136258>

U.S. Energy Information Administration. (s. f.). *Residual fuel oil*.  
<https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=residual>

U.S. Environmental Protection Agency. (1998). *Emission factor documentation for AP-42 Section 1.3: Fuel oil combustion*.  
<https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch01/bqdocs/b01s03.pdf>

Zhao, H., Li, W., Zhang, J., Ding, X., & Kang, Z. (2024). Retrofit and application of pulverized coal burners with LNG and oxygen ignition in utility boiler under ultra-low load operation. *Heliyon*, 10(8), e29154. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29154>