



**UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**“ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE
GENERACIÓN DE VAPOR DE LA REFINERÍA LA LIBERTAD,
SANTA ELENA, ECUADOR”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Previo a la obtención del título de:

INGENIERA INDUSTRIAL

AUTORA:

ASHLEY BELSABETH DIAZ SUAREZ

TUTOR:

ING. MUÑOZ BRAVO RICHARD EDINSON, MGTR

La Libertad, Ecuador

2026

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TEMA:

**“ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA
DE GENERACIÓN DE VAPOR DE LA REFINERÍA LA
LIBERTAD, SANTA ELENA, ECUADOR”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORA:

ASHLEY BELSABETH DIAZ SUAREZ

TUTOR:

ING. MUÑOZ BRAVO RICHARD EDINSON, MGTR

LA LIBERTAD – ECUADOR

2026

UPSE

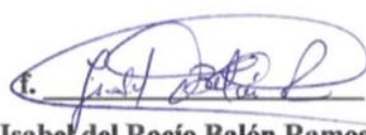
CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Ashley Belsabeth Diaz Suarez**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniera Industrial**.

TUTOR

f. 
Ing. Muñoz Bravo Richard Edinson, Mgtr.

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. 
Ing. Isabel del Rocío Balón Ramos, MSc

La Libertad, a los 20 del mes de agosto del año 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación “ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE LA REFINERÍA LA LIBERTAD, SANTA ELENA, ECUADOR”, elaborado por la Srta. ASHLEY BELSABETH DIAZ SUAREZ, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniera Industrial, me permito declarar que luego de haberla dirigido, estudiado y revisado, la apruebo en su totalidad.

TUTOR

f. 
Ing. Muñoz Bravo Richard Edinson, Mgtr.

La Libertad, a los 20 del mes de agosto del año 2026

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Ashley Belsabeth Diaz Suarez.

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, “**Estudio de la eficiencia energética en el sistema de generación de vapor de la Refinería La Libertad, Santa Elena, Ecuador**”, previo a la obtención del título de **Ingeniera Industrial** ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

La Libertad, a los 14 del mes de julio del año 2026

LA AUTORA

f. 

Ashley Belsabeth Diaz Suarez

AUTORIZACIÓN

Yo, Ashley Belsabeth Diaz Suarez.

Autorizo a la Universidad Península de Santa Elena la publicación en la biblioteca de la Institución del Trabajo de Titulación, “**Estudio de la eficiencia energética en el sistema de generación de vapor de la Refinería La Libertad, Santa Elena, Ecuador**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

La Libertad, a los 14 del mes de julio del año 2026

LA AUTORA

f. 

Ashley Belsabeth Diaz Suarez

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema “ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE LA REFINERÍA LA LIBERTAD, SANTA ELENA, ECUADOR” elaborado por la Srta. **ASHLEY BELSABETH DIAZ SUAREZ** egresada de la carrera de Ingeniería de Industrial, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, previo a la obtención del Título de Ingeniera Industrial me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio: Compilatio Magister, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un 4% de la valoración permitida por consiguiente se procede a emitir el presente informe.

Adjunto reporte de similitud.

**Certificado de análisis**
Compilatio Magister+ | UPSE-ECU

TRABAJO DE TITULACIÓN 2026-1 DÍAZ ASHLEY
ID : 2d3a5a6ae1c69dd8fa420f1947a8066f15b9966f

**4%**
Textos sospechosos

Nombre del fichero : TRABAJO DE TITULACIÓN 2026-1 DÍAZ ASHLEY.docx	Depositante : TRABAJO DE TITULACIÓN 2026-1 DIAZ SUAREZ
Tamaño del archivo original : 333.4 KB	Autor : TRABAJO DE TITULACIÓN 2026-1 DIAZ SUAREZ
Número de palabras : 15.660	Fecha de depósito : 15 de agosto de 2026
	Tipo de carga : url_submission
	fecha de fin de análisis : 16 de agosto de 2026

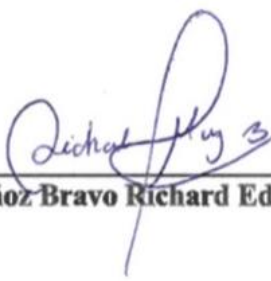
 **Resumen** (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Atentamente,

FIRMA DEL TUTOR

f. 
Ing. Muñoz Bravo Richard Edison, Mgtr.

CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

VALIDACIÓN GRAMATICAL Y ORTOGRÁFICA

CERTIFICO

Que, he realizado la revisión y corrección del Trabajo de Integración Curricular para la obtención del título de Ingeniera Industrial, con el tema: **“ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE LA REFINERÍA LA LIBERTAD, SANTA ELENA, ECUADOR”**. Ha sido desarrollado por la estudiante de la Carrera de Ingeniería Industrial: **ASHLEY BELSABETH DIAZ SUAREZ** de la Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Que, el trabajo presenta un dominio formal del lenguaje, con expresión clara, coherencia discursiva y solidez interpretativa. Asimismo, garantizando su adecuación a los estándares académicos y formales requeridos.

Por lo expuesto, se expide el presente certificado para que los interesados lo utilicen ante las instancias que correspondan.

Atentamente,



Lic. Mónica Paredes Castro, M.Sc.

Magíster en Educación Básica

Correo: misabelp1017@gmail.com

C.C: 0605353143

Celular: 0969917044

AGRADECIMIENTOS

Agradezco con todo mi amor y gratitud, a mis abuelos Carlos y Lucrecia, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida y una fuente constante de inspiración.

Gracias por su amor incondicional, por sus consejos, por los valores que inculcaron y por enseñarme, con su ejemplo, que el esfuerzo, la honestidad y la perseverancia son el camino para alcanzar los sueños. Cada palabra de aliento, cada sacrificio y cada muestra de cariño me dieron la fortaleza necesaria para superar los desafíos y llegar hasta este momento

.

Ashley Belsabeth Diaz Suarez

DEDICATORIA

A mi abuelo Carlos Suarez, quien hoy ya no está físicamente entre nosotros, pero cuya presencia permanece viva en mi corazón y en cada uno de mis logros.

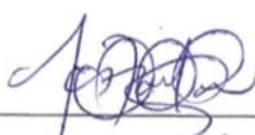
Aunque no pudo acompañarme hasta este momento, fue una parte fundamental del camino que me trajo hasta aquí. Sus enseñanzas, su ejemplo de esfuerzo, honestidad y perseverancia dejaron una huella profunda en mi vida y me inspiraron a no rendirme ante las dificultades, con profundo cariño, respeto y eterna gratitud, dedico este trabajo a su memoria.

A mi hija Aleysha, el regalo más hermoso que la vida me ha dado, mi mayor motivación para luchar cada día y poder ofrecerle un ejemplo de constancia, compromiso y amor por los sueños.

Ashley Belsabeth Diaz Suarez

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 
Ing. Isabel del Rocío Balón Ramos. MSc.
DIRECTORA DE CARRERA

f. 
ING. MSc. Luis Eduardo Tomala Villon
DOCENTE ESPECIALISTA

f. 
Ing. Richard Edinson Muñoz Bravo, Mgtr.
DOCENTE TUTOR

f. 
Ing. Edison Noe Buenaño Buenaño, Mgtr.
DOCENTE UIC

ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	i
CERTIFICACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TUTOR	iv
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	v
AUTORIZACIÓN	vi
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO	vii
CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DEDICATORIA	x
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	xi
ÍNDICE GENERAL	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xix
RESUMEN	xx
ABSTRACT.....	xxi
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del problema.....	2
Alcance de la investigación	5
Justificación de la investigación	5
Objetivos.....	6
CAPÍTULO I	8
MARCO TEÓRICO	8
1.1. Antecedentes investigativos.....	8
1.2. Estado del arte.....	9
1.3. Fundamentos teóricos	23
1.4. Protocolo de investigación.....	26
1.5. Discusión del estado del arte	27
1.6. Estado conceptual	29
CAPÍTULO II.....	34
MARCO METODOLÓGICO.....	34
2.1. Enfoque de investigación.....	34

2.2.	Diseño de investigación	35
2.3.	Proceso metodológico.....	36
2.4.	Población y muestra.....	38
2.5.	Método e instrumento de recolección de datos.....	39
2.6.	Plan de recolección de datos	40
2.7.	Procedimiento para recolección de datos.....	40
2.8.	Procesamiento y análisis de datos.....	41
2.9.	Línea base energética.....	43
2.10.	Indicadores de desempeño energético.....	44
2.11.	Validación del instrumento de encuesta.....	45
2.12.	Procedimiento metodológico según objetivos	45
2.13.	Variable de estudio.....	46
2.14.	Operacionalización de las variables	47
CAPÍTULO III.....		50
MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN		50
3.1.	Marco de resultados	50
3.2.	Desarrollo de la metodología del proyecto	58
3.3.	Plan de optimización energética	88
3.4.	Discusión de resultados	90
CONCLUSIONES		92
RECOMENDACIONES.....		93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		95
ANEXOS		101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Escala de valoración de la matriz GUT.....	3
Tabla 2.	Matriz GUT.	4
Tabla 3.	Ecuación de búsqueda Scopus.....	12
Tabla 4.	Criterios de inclusión y exclusión de artículos científicos.	13
Tabla 5.	Método SPICE aplicado a la revisión literaria.	14
Tabla 6.	Matriz de artículos científicos.	20
Tabla 7.	Agrupación metodológica de los artículos seleccionados.	22
Tabla 8.	Herramientas y técnicas identificadas en la literatura reciente.	22
Tabla 9.	Frecuencia de uso de herramientas y técnicas seleccionadas.	23
Tabla 10.	Indicadores técnicos requeridos para el diagnóstico energético.	25
Tabla 11.	Estado conceptual de la investigación.	29
Tabla 12.	Información general de ubicación de la Refinería La Libertad.	31
Tabla 13.	Descripción del proceso de generación de vapor en la caldera 3.	33
Tabla 14.	Etapas del proceso metodológico.	37
Tabla 15.	Población y muestra de la investigación.....	38
Tabla 16.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	39
Tabla 17.	Plan de recolección de datos.....	40
Tabla 18.	Procedimiento para la recolección de datos.....	41
Tabla 19.	Procesamiento y análisis de datos.....	42
Tabla 20.	Trazabilidad de las variables empleadas en el balance y diagnóstico.	43
Tabla 21.	Datos requeridos para la línea base energética.	44
Tabla 22.	Indicadores de desempeño energético de la caldera 3.	44
Tabla 23.	Proceso metodológico según objetivos.....	45
Tabla 24.	Operacionalización de variables de estudio.....	48
Tabla 25.	Muestreo no probabilístico aplicado al estudio.	51
Tabla 26.	Plan de recolección de datos.....	52
Tabla 27.	Escala Likert aplicada en el cuestionario.....	53
Tabla 28.	Asignación de preguntas por variable y dimensión.	53
Tabla 29.	Modelo de validación del instrumento por expertos.....	54
Tabla 30.	Análisis de validación del instrumento por expertos.....	54
Tabla 31.	Escala de interpretación del alfa de Cronbach.....	55
Tabla 32.	Resultado de fiabilidad del cuestionario.	55

Tabla 33.	Resultados descriptivos del cuestionario Likert.	55
Tabla 34.	Resumen por variable de estudio.	56
Tabla 35.	Escala de interpretación del coeficiente de Pearson.	57
Tabla 36.	Correlación de Pearson entre variables de estudio.	57
Tabla 37.	Delimitación del caso de estudio.	58
Tabla 38.	Tipos de energía utilizada en el sistema de generación de vapor.	59
Tabla 39.	Registros mensuales para la línea base energética de la caldera 3.	60
Tabla 40.	Áreas vinculadas con el diagnóstico energético.	61
Tabla 41.	Usos significativos de energía en la caldera 3.	62
Tabla 42.	Ficha técnica de la caldera 3.	63
Tabla 43.	Equipos auxiliares vinculados con la caldera 3.	63
Tabla 44.	Fórmulas aplicadas en el diagnóstico energético.	64
Tabla 45.	Balance térmico anual aplicado a la caldera 3.	65
Tabla 46.	Indicadores mensuales de desempeño energético.	65
Tabla 47.	Clasificación de periodos según eficiencia térmica.	67
Tabla 48.	Balance exergético global aplicado a la caldera 3.	67
Tabla 49.	Resultados mensuales de emisiones de la caldera 3.	69
Tabla 50.	Índice SO ₂ /límite de la caldera 3.	69
Tabla 51.	Verificación de emisiones entre diciembre de 2025 y marzo de 2026.	70
Tabla 52.	Aplicación del control de combustión y calidad del Fuel Oil.	71
Tabla 53.	Consumo anual actual de fuel oil y vapor.	72
Tabla 54.	Proyección de consumo futuro de fuel oil.	72
Tabla 55.	Matriz GUT de condiciones críticas de la caldera 3.	73
Tabla 56.	Oportunidades de optimización energética.	74
Tabla 57.	Datos ingresados en MEASUR Tool para el escenario base.	76
Tabla 58.	Parámetros en el escenario optimizado de MEASUR Tool.	77
Tabla 59.	Cálculo del incremento de retorno de condensado en MEASUR.	79
Tabla 60.	Resultados emitidos por MEASUR Tool.	79
Tabla 61.	Oportunidades de optimización energética.	82
Tabla 62.	Carga eléctrica auxiliar.	83
Tabla 63.	Evaluación preliminar de sistema fotovoltaico auxiliar.	84
Tabla 64.	Plan de mantenimiento energético para la caldera 3.	84
Tabla 65.	Presupuesto estimado de optimización energética.	86
Tabla 66.	Sumatoria del retorno de inversión.	86

Tabla 67.	Sensibilidad económica de las acciones térmicas de optimización.	87
Tabla 68.	Análisis comparativo entre situación actual y propuesta.....	87
Tabla 69.	Plan de optimización energética para la caldera 3.....	88
Tabla 70.	Modalidad de implementación de las acciones energética.	89
Tabla 71.	Cuadro de mando para conservar la mejora energética de la caldera 3....	89
Tabla 72.	Criterios de viabilidad económica y ambiental de la propuesta.	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Proceso de revisión literaria.....	11
Figura 2.	Fuentes científicas más relevantes del corpus analizado.	14
Figura 3.	Producción científica por país.....	15
Figura 4.	Palabras más frecuentes en el corpus.....	15
Figura 5.	Documentos con mayor número de citas globales.....	16
Figura 6.	Red de coocurrencia.....	16
Figura 7.	Agrupamiento por acoplamiento temático.....	17
Figura 8.	Nube de palabras.....	17
Figura 9.	Producción científica anual.....	18
Figura 10.	Revisión literaria (PRISMA Flow Diagram).	19
Figura 11.	Protocolo del ciclo de diseño metodológico del diagnóstico energético. .	27
Figura 12.	Logotipo institucional de EP Petroecuador.	30
Figura 13.	Localización de la Refinería La Libertad.	31
Figura 14.	Organigrama del área vinculada con el estudio.	32
Figura 15.	Diseño metodológico de la investigación.	36
Figura 16.	Ruta del diagnóstico energético de la caldera 3.....	37
Figura 17.	Consumo mensual de fuel oil y producción de vapor.....	60
Figura 18.	Diagrama energético productivo del sistema de generación de vapor.....	61
Figura 19.	Diagrama de flujo del proceso de generación de vapor.....	63
Figura 20.	Eficiencia térmica mensual de la caldera 3.....	66
Figura 21.	Consumo específico mensual de fuel oil.	66
Figura 22.	Comportamiento mensual de SO ₂ frente al límite permisible.	69
Figura 23.	Índice SO ₂ /límite de la caldera 3	70
Figura 24.	Priorización de condiciones críticas mediante matriz GUT.	74
Figura 25.	Escenario optimizado con ajustes de combustión MEASUR Tool.	78
Figura 26.	Reporte ejecutivo del escenario optimizado en MEASUR Tool.	80
Figura 27.	Consumo energético evaluado en MEASUR Tool.	81
Figura 28.	Costo anual total de la línea base y escenario optimizado.....	81
Figura 29.	Composición del ahorro anual estimado por MEASUR Tool.	81
Figura 30.	Inversión térmica y ahorro anual del escenario optimizado.	82
Figura 31.	Diagrama de flujo del mantenimiento energético.....	85

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A.	<i>Operacionalización de variables de estudio – variable dependiente.</i>	101
Anexo B.	<i>Operacionalización de variables de estudio – variable independiente. .</i>	101
Anexo C.	<i>Validación por expertos.</i>	102
Anexo D.	<i>Encuestas para operadores.</i>	102
Anexo E.	<i>Ficha técnica del instrumento.</i>	103
Anexo F.	<i>Validación del instrumento de medición.</i>	103
Anexo G.	<i>Solicitud de aplicación del instrumento.</i>	104
Anexo H.	<i>Interfaz principal de MEASUR Tool.</i>	104
Anexo I.	<i>Configuración de unidades del assessment aplicado a la caldera 3.</i>	105
Anexo J.	<i>Delimitación del modelo sin turbina de condensación.</i>	105
Anexo K.	<i>Línea base configurada y habilitación de oportunidades de eficiencia.</i>	105
Anexo L.	<i>Escenario optimizado con ajustes de combustión.</i>	106
Anexo M.	<i>Reporte ejecutivo del escenario optimizado por MEASUR Tool.</i>	106

LISTA DE ABREVIATURAS

La siguiente lista define las abreviaturas técnicas utilizadas en el desarrollo del estudio. Su incorporación evita ambigüedades metodológicas y permite que los instrumentos, indicadores y resultados se interpreten de manera uniforme.

Abreviaturas técnicas utilizadas en la investigación.

- **C3 (Caldera 3):** equipo seleccionado como unidad técnica de análisis.
- **CO (Monóxido de carbono):** parámetro de emisión atmosférica asociado a combustión.
- **SO₂ (Dióxido de azufre):** parámetro ambiental crítico observado en la caldera 3.
- **NO_x (Óxidos de nitrógeno):** parámetro de emisión atmosférica de seguimiento.
- **EnPI (Energy Performance Indicator):** indicador de desempeño energético.
- **FMEA (Failure Mode and Effects Analysis):** herramienta para analizar fallas, efectos y priorización de riesgos operativos.
- **GUT (Gravedad, Urgencia y Tendencia):** matriz de priorización de problemas.
- **PCI (Poder calorífico inferior):** dato requerido para calcular energía suministrada por el fuel oil.
- **RLL (Refinería La Libertad):** unidad industrial donde se desarrolla el caso de estudio.
- **Wt% (Porcentaje en peso):** unidad usada para expresar contenido de azufre del fuel oil.

Como se observa, las abreviaturas se relacionan directamente con la unidad de análisis, los contaminantes evaluados, los indicadores energéticos y las herramientas de priorización.

“ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE LA REFINERÍA LA LIBERTAD, SANTA ELENA, ECUADOR”

Autora: Ashley Belsabeth Diaz Suarez

Tutor: Ing. Muñoz Bravo Richard Edinson, Mgtr.

RESUMEN

La investigación se realizó con el objetivo de evaluar la eficiencia energética de la caldera 3, perteneciente al sistema de generación de vapor de la Planta Generación de la Refinería La Libertad, ubicada en Santa Elena, Ecuador. Para desarrollar esta evaluación se tomó la información de operación registrada entre junio 2025 – mayo 2026 y se revisó qué condiciones críticas se presentaron durante ese tiempo, además de las posibles mejoras para el equipo. El estudio tuvo un enfoque mixto con predominio cuantitativo, diseño no experimental y alcance descriptivo-correlacional. La información necesaria para el trabajo se reunió revisando documentos técnicos, mediante observación del sistema y con una encuesta tipo Likert realizada a 10 participantes. También se calcularon indicadores energéticos, se revisaron las emisiones, se aplicó la matriz GUT y se evaluaron económicamente las alternativas de optimización. La confiabilidad del instrumento fue buena, obteniéndose un alfa de Cronbach de 0,846. En el análisis estadístico se encontró una correlación positiva muy fuerte entre el sistema de generación de vapor y la eficiencia energética, con un coeficiente de Pearson de 0,812 y una significancia bilateral de 0,004. En los doce meses considerados, la caldera 3 consumió 813.200 galones de fuel oil y produjo 45.790 toneladas de vapor. Con estos registros se obtuvo un consumo específico promedio de 17,76 gal/t y una eficiencia térmica promedio de 83,95 %. Al revisar las emisiones, enero y febrero de 2026 fueron los meses donde el SO₂ sobrepasó el límite utilizado como referencia. Por esta razón, los resultados también muestran la conveniencia de mantener un seguimiento mensual de la caldera, utilizando la línea base, los indicadores, la revisión de la combustión y el mantenimiento energético. Finalmente, se planteó un plan de optimización energética con un ahorro anual estimado de 95.005 USD y un retorno simple global de 1,28 años.

Palabras clave: eficiencia energética, generación de vapor, caldera industrial, fuel oil, indicadores energéticos.

“STUDY OF ENERGY EFFICIENCY IN THE STEAM GENERATION SYSTEM OF THE LA LIBERTAD REFINERY, SANTA ELENA, ECUADOR”

Author: Ashley Belsabeth Diaz Suarez

Tutor: Ing. Muñoz Bravo Richard Edinson, Mgtr.

ABSTRACT

The research was carried out to evaluate the energy efficiency of Boiler 3, which is part of the steam generation system of the Power Generation Plant at La Libertad Refinery, Santa Elena, Ecuador. The analysis considered operating conditions recorded from June 2025 – May 2026 in order to identify critical conditions and possible opportunities for improvement. The study followed a mixed approach with quantitative predominance, a non-experimental design, and a descriptive-correlational scope. Data for the study came from technical documents, direct observation of the system, and a Likert-scale survey completed by 10 participants. Energy indicators were calculated as part of the analysis, while emissions and the GUT matrix were also reviewed together with the economic evaluation of the proposed alternatives. The survey instrument obtained a Cronbach’s alpha of 0.846, which indicated good reliability. The statistical results showed a very strong positive relationship between the steam generation system and energy efficiency, reaching a Pearson coefficient of 0.812 with a bilateral significance of 0.004. Over the twelve-month period, Boiler 3 used 813,200 gallons of fuel oil to produce 45,790 tons of steam. These records gave an average specific consumption of 17.76 gal/t and an average thermal efficiency of 83.95%. In the emissions review, SO₂ exceeded the reference limit in January and February 2026. The results therefore indicate that Boiler 3 should be followed on a monthly basis using its energy baseline, performance indicators, combustion checks, and energy maintenance records. Finally, the proposed energy optimization plan gives an estimated annual saving of USD 95.005, with a global simple payback of 1.28 years.

Keywords: industrial boiler, steam generation, fuel oil, energy performance, energy efficiency.

INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética en la industria se ha vuelto un tema importante, especialmente en procesos donde se utilizan de forma continua calor, combustibles y sistemas de vapor. International Energy Agency (2025) reporta que el consumo final mundial de energía superó los 450 EJ en 2024 y que alrededor del 40 % correspondió al sector industrial. Esta participación permite observar la importancia de revisar los sistemas térmicos a partir de datos reales de operación e indicadores que ayuden a conocer cómo se está utilizando la energía.

En los sistemas de generación de vapor, la eficiencia de una caldera depende de la energía aportada por el combustible y del vapor que se logra producir para los procesos de la planta. En este funcionamiento intervienen la presión, temperatura, agua de alimentación, retorno de condensado y purgas, además del control de combustión, las condiciones de los quemadores y el mantenimiento del equipo. Alhashem et al. (2025) indican que el control térmico y el manejo de los gases de combustión influyen en el aprovechamiento energético de las calderas de vapor. Por esta razón, para evaluar la eficiencia también se debe revisar cómo está trabajando la caldera y no únicamente la cantidad de combustible que consume.

En América Latina y el Caribe, la eficiencia energética también está relacionada con la competitividad de las industrias, debido a que un mejor aprovechamiento de la energía puede disminuir costos y reducir el uso innecesario de recursos. Carvajal et al. (2025) mencionan que la región todavía necesita fortalecer la eficiencia energética dentro de las actividades productivas para reducir ineficiencias y avanzar hacia procesos más sostenibles. Esto hace necesario que los sistemas térmicos sean evaluados para conocer dónde se concentra el consumo, qué pérdidas se presentan y cuáles mejoras pueden plantearse con base en información técnica.

En el caso de Ecuador, una parte del consumo de energía de la industria todavía proviene de combustibles empleados para generar calor en los procesos. Los datos del Balance Energético Nacional 2023 indican un consumo total de 102.042 kBEP para el país. De ese valor, 16.936 kBEP corresponden al sector industrial, es decir, cerca del 17 %. Para el fuel oil se registraron 1.832 kBEP, cantidad que equivale aproximadamente a 74,68 millones de galones, según el Ministerio de Energía y Minas (2024). Estos datos

muestran la importancia de revisar cómo están funcionando los equipos industriales que dependen de combustibles pesados para generar energía.

La Refinería La Libertad está ubicada en la provincia de Santa Elena y cuenta con sistemas térmicos destinados a la generación de vapor requerido en diferentes operaciones industriales. Dentro de su estructura se encuentran Planta Cautivo, Planta Refinería y Planta Generación, donde operan equipos vinculados con combustión, calentamiento, producción de vapor y soporte energético. En esta investigación el análisis se concentra en la Planta Generación y específicamente en la caldera 3, que fue seleccionada como unidad técnica de estudio.

En la caldera 3 se han registrado antecedentes técnicos relacionados con combustión y emisiones que necesitan ser revisados junto con su comportamiento de operación. Esto no quiere decir que ya se tenga definida la causa del problema, sino que estos datos sirven como punto de partida para revisar lo que ocurre en el equipo. Por eso también se consideran el consumo de combustible, el vapor producido, el mantenimiento realizado, los costos y las condiciones ambientales registradas.

Para evaluar la eficiencia energética de la caldera 3 se trabajó con los registros históricos que estaban disponibles. Primero se ordenó la información del equipo y con estos datos se construyó la línea base energética. Después se obtuvieron los indicadores necesarios para revisar su desempeño. A partir del diagnóstico se pueden identificar las condiciones críticas presentes durante la operación y las oportunidades de mejora. Finalmente, con los resultados obtenidos se plantea un plan de optimización considerando las condiciones reales de funcionamiento del sistema de generación de vapor de la Refinería La Libertad.

Planteamiento del problema

En las industrias, los sistemas de generación de vapor tienen una función importante debido al consumo continuo de combustible y a su relación con los costos de operación, la estabilidad de los procesos y el comportamiento ambiental. Cuando la información se mantiene separada entre registros de operación, consumo y mantenimiento, algunas pérdidas energéticas pueden no ser identificadas con facilidad. Saha et al. (2021) sostienen que el desempeño de los sistemas de vapor debe revisarse considerando conjuntamente la generación, distribución, consumo y pérdidas, debido a que estos elementos determinan la eficiencia real del sistema.

En América Latina y el Caribe todavía se presentan dificultades para aprovechar mejor la energía utilizada por el sector industrial. Esta situación influye en los costos de operación, la competitividad y el uso de combustibles dentro de los procesos productivos. En Ecuador este problema también tiene importancia en instalaciones donde se emplean combustibles pesados para producir energía térmica. Saber solamente cuánto combustible se consume no permite determinar por sí solo si un equipo está trabajando de manera eficiente. El Ministerio de Energía y Minas (2024) señala que el fuel oil continúa formando parte del consumo energético nacional, por lo que también resulta necesario evaluar técnicamente los equipos que utilizan este combustible para producir energía útil.

En la Refinería La Libertad, la Planta Generación dispone de calderas encargadas de producir vapor para apoyar sus operaciones industriales. Dentro de este sistema, la caldera 3 registra concentraciones de SO₂ de 2.321 mg/Nm³ y 2.038 mg/Nm³ frente a un límite permisible de 2.004 mg/Nm³, además de un contenido de azufre del fuel oil de 1,59 % en peso. Estos valores se consideran señales técnicas que deben analizarse junto con el consumo de fuel oil, producción de vapor, presión, temperatura, agua de alimentación, mantenimiento, costos e indicadores energéticos, sin asumir desde el inicio una causa única para el comportamiento energético o ambiental del equipo EP Petroecuador (2026).

Para ordenar las condiciones que requieren mayor atención en la investigación se utiliza la matriz GUT, considerando la gravedad, urgencia y tendencia de cada problema identificado. La herramienta permite establecer prioridades entre las situaciones encontradas sin asumir desde el comienzo que alguna de ellas constituye necesariamente la causa principal. De esta manera, el diagnóstico puede iniciar por los aspectos que presentan mayor importancia técnica. La escala empleada para realizar esta valoración se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. *Escala de valoración de la matriz GUT.*

Escala de puntos	Gravedad	Urgencia	Tendencia
1	Muy baja.	Puede atenderse a largo plazo.	No cambia con el tiempo.
2	Baja.	Puede atenderse en seis meses.	Cambia lentamente.
3	Moderada.	Requiere atención en tres meses.	Empeora a mediano plazo.
4	Alta.	Requiere atención en un mes.	Empeora pronto.
5	Critica.	Requiere atención inmediata.	Empeora rápidamente.

Nota. Elaborado por la autora.

La escala permite establecer qué nivel de prioridad tiene cada una de las condiciones identificadas en la caldera 3. Para este estudio, la matriz GUT sirve como

apoyo para organizar los problemas encontrados al inicio y dirigir el diagnóstico energético hacia aquellos aspectos técnicos que presentan una mayor criticidad.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos con la matriz GUT para las principales condiciones que tienen relación con la eficiencia energética de la caldera 3. Para definir la prioridad de cada una se toma en cuenta el efecto que puede tener a nivel técnico, operativo, económico y ambiental dentro del sistema de generación de vapor.

Tabla 2. *Matriz GUT.*

Problema	Descripción	G	U	T	Punt
Elevadas emisiones de SO ₂ en la caldera 3.	Registros de 2.321 mg/Nm ³ y 2.038 mg/Nm ³ frente a un límite reportado de 2.004 mg/Nm ³ , condición que requiere análisis energético, operativo y ambiental.	5	5	5	125
Calidad del fuel oil utilizado.	Contenido de azufre cercano a 1,59 % en peso, condición técnica que debe analizarse junto con emisiones, combustión, depósitos, mantenimiento y desempeño térmico.	5	4	5	100
Ausencia de línea base energética de C3.	No se dispone de un comportamiento histórico estructurado que relacione fuel oil, vapor, presión, temperatura, horas de operación, emisiones y costos.	4	4	4	64
Falta de indicadores de desempeño por caldera.	La ausencia de consumo específico, eficiencia térmica, vaporización específica y costo por tonelada de vapor limita la evaluación del rendimiento real del equipo.	4	3	4	48
Pérdidas térmicas y condiciones operativas no cuantificadas.	Purgas, fugas, aislamiento, retorno de condensado, exceso de aire, limpieza de quemadores y mantenimiento pueden afectar el consumo, pero requieren medición y priorización.	3	3	4	36

Nota. Elaborado por la autora.

Al revisar la matriz GUT, las desviaciones de SO₂ registradas en la caldera 3 quedaron como el problema que necesita mayor atención, con un puntaje de 125. La calidad del fuel oil también aparece entre los aspectos que deben revisarse, pero no de manera aislada, sino junto con la combustión, el mantenimiento y el comportamiento térmico que presenta la caldera. También se encontró que todavía no se cuenta con una línea base energética ni con indicadores propios para cada caldera, además existen pérdidas que aún no han podido ser cuantificadas. Todo esto muestra la necesidad de realizar un diagnóstico donde las señales ambientales puedan revisarse en conjunto con las variables energéticas, operativas y económicas del sistema.

Formulación del problema de investigación

¿De qué manera las condiciones operativas que presenta el sistema de generación de vapor están relacionadas con la eficiencia energética de la caldera 3 de la Planta

Generación de la Refinería La Libertad, Santa Elena, Ecuador, durante el periodo 2025-2026?

Alcance de la investigación

El estudio tiene un alcance descriptivo-correlacional. En la parte descriptiva se revisa el comportamiento que presentó la caldera 3 tomando en cuenta información operativa, energética, ambiental y económica obtenida de los registros históricos y datos técnicos disponibles. La parte correlacional se utiliza para conocer si existe relación entre las condiciones operativas del sistema de generación de vapor y la eficiencia energética de la caldera. Ramos-Galarza (2020), explica que los estudios descriptivos permiten conocer las características que presenta un fenómeno, mientras que en los correlacionales se analiza cómo se relacionan las variables sin que estas sean manipuladas.

El estudio se realiza en la Refinería La Libertad, ubicada en Santa Elena, Ecuador. La refinería cuenta con varias áreas de operación, entre las que están Planta Cautivo, Planta Refinería y Planta Generación. Para esta investigación no se consideran todas estas áreas, ya que el análisis se limita a la caldera 3 que pertenece a la Planta Generación, utilizando información del periodo 2025-2026. La revisión del equipo toma en cuenta los datos que se han registrado sobre consumo de fuel oil y producción de vapor, además de presión, temperatura, agua de alimentación y las horas que la caldera estuvo operando. También se consideran los registros de emisiones, costos y mantenimiento. Con estos datos se puede conocer su comportamiento energético y revisar cómo se relacionan las variables que intervienen durante la operación.

El estudio no busca explicar de forma definitiva las causas de los problemas encontrados ni realizar pruebas directamente en la caldera. Tampoco se consideran cambios en el diseño de los equipos, sustitución del combustible o modificaciones en la operación que actualmente mantiene la refinería. El trabajo se concentra en revisar técnicamente la información que se encuentra disponible, construir una línea base, calcular los indicadores correspondientes y, con los resultados obtenidos en el diagnóstico, plantear un plan de optimización energética.

Justificación de la investigación

Desde el punto de vista técnico, el estudio se realiza porque es necesario conocer cómo se está comportando energéticamente la caldera 3 dentro del sistema de generación de vapor. Para esto se revisan registros históricos e indicadores relacionados con consumo

de fuel oil, producción de vapor, presión, temperatura, agua de alimentación, emisiones, costos y mantenimiento. Con esta información se busca contar con una referencia técnica que permita entender de mejor manera el desempeño que presenta el equipo.

En la parte operativa se revisa lo que ocurre durante el funcionamiento de la caldera y qué situaciones pueden hacer que su rendimiento cambie. Aquí se toman en cuenta las variaciones que aparecen en el consumo, las pérdidas de calor, las purgas y el estado del mantenimiento. También se revisa cómo se comportan los gases de combustión y si existen indicadores propios para el equipo. Al reunir esta información es más fácil reconocer qué puntos necesitan seguimiento y cuáles deberían considerarse para el control y las mejoras dentro de la Planta Generación.

En la parte económica se revisa cuánto combustible utiliza la caldera para producir vapor y qué costo representa esta operación. Para la caldera 3 se obtiene el consumo específico de fuel oil y también el costo específico del vapor. Estos valores ayudan a conocer si el comportamiento energético del equipo está generando mayores costos y en qué puntos podrían reducirse algunas pérdidas durante la operación.

Para la parte ambiental se revisan las emisiones junto con lo que ocurre energética y operativamente en la caldera. Durante diciembre de 2025, las mediciones internas registraron valores de SO_2 que estuvieron por encima del límite reportado para la caldera 3. Este dato se revisa junto con otros aspectos del funcionamiento, entre ellos la calidad del fuel oil, la combustión y el mantenimiento. También se consideran los indicadores que se van obteniendo a partir del diagnóstico.

En la parte académica, el trabajo permite aplicar el análisis de eficiencia energética directamente sobre un sistema de generación de vapor que se encuentra en operación. Para hacerlo se utilizan los registros históricos de la caldera, se construye la línea base y se calculan los indicadores necesarios antes de ordenar las oportunidades encontradas. Con la información obtenida se planteó un plan de optimización para la caldera 3 sin tener que realizar modificaciones directas durante su funcionamiento. El estudio también puede ser utilizado como referencia cuando se necesite hacer una evaluación similar en otras calderas de uso industrial.

Objetivos

Objetivos generales

Evaluar la eficiencia energética del sistema de generación de vapor de la Planta Generación de la Refinería La Libertad, Santa Elena, Ecuador, mediante el análisis de sus

condiciones operativas, para la determinación de condiciones críticas y oportunidades de mejora en su desempeño energético.

Objetivos específicos

OE. 1. Realizar una revisión sistemática de la literatura sobre eficiencia energética en sistemas de generación de vapor industrial, mediante el análisis de estudios científicos especializados, para la delimitación de variables, indicadores y enfoques metodológicos aplicables al caso de estudio.

OE. 2. Diseñar el marco metodológico del estudio del sistema de generación de vapor de la Planta Generación de la Refinería La Libertad, mediante la selección de métodos, técnicas, instrumentos y criterios de análisis, para la estructuración del proceso investigativo.

OE. 3. Proponer un plan de optimización energética para la caldera 3 del sistema de generación de vapor de la Planta Generación de la Refinería La Libertad, con base en los resultados del diagnóstico energético, para el mejoramiento de su desempeño operativo, energético y ambiental.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes investigativos

En el ámbito internacional, Saha et al. (2021a) analizaron el desempeño de sistemas de vapor utilizados en industrias textiles de Bangladesh, buscando reconocer dónde se estaban produciendo pérdidas de energía durante la generación, distribución y uso final del vapor. El estudio fue cuantitativo y trabajó con mediciones obtenidas durante la operación, cálculo de pérdidas de calor y revisión del sistema de vapor. Los resultados indicaron una eficiencia promedio cercana al 76 % en las unidades analizadas, además se encontraron pérdidas importantes tanto en los gases de combustión como en las redes de distribución. Este trabajo sirve como referencia para la caldera 3 porque permite considerar no solamente cuánto fuel oil consume, sino también cuánto vapor genera, cómo se aprovecha la energía y qué pérdidas pueden presentarse dentro del sistema.

Corbita et al. (2024) realizaron una auditoría energética en dos calderas industriales de 22 TPH para conocer la eficiencia del sistema, calcular las pérdidas de calor y establecer posibles medidas de conservación energética. Para revisar el funcionamiento de las calderas se hicieron pruebas de desempeño y se trabajó con el método indirecto. En esta revisión se tomaron en cuenta las pérdidas producidas por gases secos, las purgas y las condiciones que presentaba el combustible. Con los resultados se observó que el rendimiento cambia según varias condiciones que ocurren durante la operación y también por aspectos térmicos del equipo. Por este motivo, para la presente investigación se consideran datos como consumo de fuel oil, presión, temperatura, producción de vapor, agua de alimentación y emisiones.

Chamorro et al. (2024) trabajaron con una caldera acuotubular y revisaron su comportamiento energético mientras se encontraba en operación. Para esto utilizaron el monitoreo de diferentes variables con la intención de tener una referencia que permitiera reconocer cuándo aparecían cambios en el consumo. Durante el estudio se elaboró una línea base y una línea meta, y luego se dio seguimiento a las variables operativas junto con los indicadores energéticos. Al trabajar con los datos obtenidos directamente del equipo fue posible observar con mayor claridad las variaciones que se iban presentando. Este antecedente se toma en cuenta porque muestra la utilidad de contar con una línea base propia para hacer el seguimiento energético de la caldera 3.

En el ámbito nacional, Castillo & Salgado (2025) estudiaron la eficiencia energética de los sistemas de generación de vapor de alta y de generación eléctrica que funcionan en la Refinería Esmeraldas. El trabajo tuvo como objetivo proponer un programa de eficiencia energética para estos sistemas. Para su desarrollo se utilizaron balances de energía, cálculos de entalpía y exergía, con apoyo del software EES. A partir del análisis se relacionaron las condiciones energéticas de los sistemas con diferentes oportunidades de mejora dentro de una instalación petrolera ecuatoriana. Este antecedente aporta al estudio porque muestra que en refinerías del país también es necesario revisar los sistemas de generación de vapor mediante variables técnicas e indicadores energéticos.

En el ámbito local, Balón Yagual (2017) trabajó con las calderas de la Planta Cautivo de la Refinería La Libertad, ubicada en la provincia de Santa Elena. Su estudio se enfocó en los problemas que existían en la generación de vapor y en la posibilidad de renovar los equipos que estaban funcionando en esa planta. Para desarrollar el trabajo se utilizaron técnicas de ingeniería, revisión de los procesos, información tomada de la operación y una evaluación económica. Este estudio resulta útil como referencia porque fue realizado en la misma Refinería La Libertad, aunque atendió una situación diferente. Al revisar los trabajos anteriores se observa que ya existen análisis relacionados con calderas y sistemas de vapor, pero ninguno se ha dirigido de forma puntual al comportamiento energético de la caldera 3 de la Planta Generación. Por esta razón, el presente estudio se concentra en esa unidad y en las condiciones con las que se encuentra operando.

1.2. Estado del arte

El estado del arte sobre eficiencia energética en sistemas de generación de vapor muestra que los estudios han ido cambiando. Antes se concentraban principalmente en balances térmicos convencionales, mientras que ahora también se utilizan herramientas para monitorear variables importantes, controlar la operación y anticipar posibles cambios en el comportamiento del sistema. Wang et al. (2024) plantean un sensor suave híbrido para estimar el contenido de oxígeno en los gases de combustión, ya que esta variable permite conocer cómo se está desarrollando la combustión y cómo puede relacionarse con la eficiencia energética. Esto muestra que actualmente el control de las calderas industriales no depende únicamente de registros tomados de manera manual, sino

también del uso de las señales de operación para obtener información que ayude en la toma de decisiones.

La recuperación del calor que todavía se encuentra disponible en los gases de salida es otra de las alternativas que se están estudiando para mejorar los sistemas de generación de vapor. Rastegarpour et al. (2023) analizaron un sistema que recupera calor de los gases de combustión mediante un intercambiador condensante y un control predictivo no lineal, buscando mejorar la eficiencia energética durante la operación. Este tipo de trabajos muestra que una mejora no siempre tiene que enfocarse solamente en consumir menos combustible. También puede revisarse la energía que aún queda en los gases de salida y determinar si realmente existen las condiciones técnicas para poder aprovecharla.

Desde el punto de vista técnico y económico, Terhan et al. (2023) revisaron diferentes opciones para recuperar calor residual utilizando economizador, economizador condensante y precalentador de aire. En el análisis se tomaron en cuenta el coeficiente de exceso de aire, la temperatura de los gases, la capacidad de la caldera y el consumo de combustible para comparar las distintas alternativas. Este estudio aporta a la presente investigación porque muestra que una propuesta de optimización no debe evaluarse únicamente por la mejora térmica que pueda generar. También es necesario revisar cuánto costaría aplicarla y si realmente se ajusta a las condiciones en las que trabaja el equipo.

También existen estudios que revisan lo que ocurre con el vapor una vez que llega a los equipos donde se utiliza el calor. Gao et al. (2024) analizaron un sistema industrial de vapor tomando en cuenta varias unidades consumidoras y las medidas de ahorro que podían aplicarse durante su uso. Con este enfoque se observa que para evaluar el desempeño energético no basta con revisar solamente la generación del vapor. También intervienen la distribución, la forma en que se consume el vapor y cuánto de esa energía realmente se aprovecha dentro del proceso industrial.

Después de generar el vapor todavía puede quedar calor disponible que puede ser aprovechado en otras partes del sistema. Saari et al. (2021) revisaron esta posibilidad en la zona posterior de una caldera de recuperación, probando diferentes configuraciones y opciones donde podía utilizarse ese calor. El estudio permitió ver que existen oportunidades de mejora que aparecen después del proceso principal de generación. Por eso, para analizar la eficiencia no conviene observar únicamente lo que sucede dentro de la caldera. También hay que considerar cómo se genera el calor, cuánto puede recuperarse, dónde se utiliza y si existen condiciones reales para aprovecharlo.

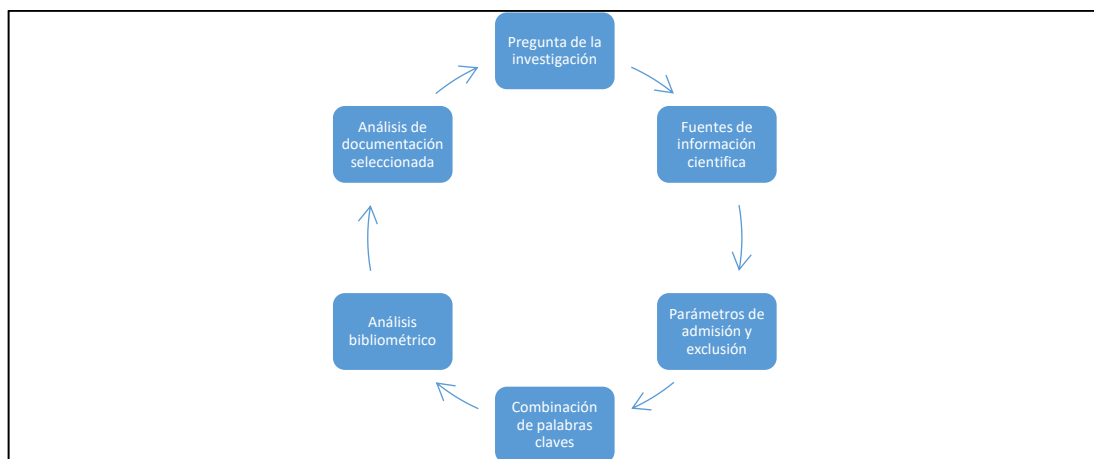
Finalmente, los estudios recientes también toman en cuenta las condiciones de operación que pueden modificar la eficiencia térmica de una caldera. Mo et al. (2022) analizaron aspectos como la humedad del combustible, el exceso de aire y la concentración de oxígeno, encontrando que el rendimiento térmico cambia por la interacción entre la calidad del combustible, la combustión y el flujo de gases. Esta tendencia tiene relación con el estudio de la caldera 3 porque indica que las condiciones de operación, el combustible utilizado y las emisiones deben revisarse en conjunto, sin considerar desde el inicio que una sola de estas variables sea la causa del comportamiento energético observado.

1.2.1 Proceso de revisión literaria

Para realizar la revisión de literatura primero se buscó conocer qué métodos, variables, indicadores y herramientas técnicas habían sido utilizados en trabajos recientes sobre eficiencia energética en sistemas industriales de vapor. El proceso se dividió en seis etapas. Se comenzó con la formulación de la pregunta de investigación y la selección de las fuentes donde se realizaría la búsqueda. Luego se definieron las palabras clave, los criterios para incluir o descartar documentos y la estructura SPICE junto con el análisis bibliométrico. Finalmente, se revisó la documentación que quedó seleccionada. Esta secuencia se presenta de forma resumida en la Figura 1.

La Figura 1 muestra cómo se fue desarrollando la revisión literaria desde la pregunta de investigación hasta la búsqueda, depuración y selección de los documentos. De esta manera, las fuentes utilizadas para construir el marco teórico fueron escogidas siguiendo un proceso definido y no a partir de una selección arbitraria.

Figura 1. *Proceso de revisión literaria.*



Nota. Elaborado por la autora.

1.2.2 Primera etapa – Pregunta de investigación

La revisión literaria se organizó a partir de la siguiente pregunta:

¿Qué metodologías, variables, indicadores y herramientas técnicas se identifican en la literatura científica reciente para evaluar la eficiencia energética en sistemas industriales de generación de vapor?

Esta pregunta permitió orientar la búsqueda hacia investigaciones relacionadas con calderas, combustión, recuperación de calor, consumo de combustible, gases de combustión, pérdidas térmicas e indicadores de desempeño.

1.2.3 Segunda etapa – Fuentes de información

La búsqueda de documentos se realizó en Scopus, ya que esta base reúne publicaciones científicas indexadas relacionadas con ingeniería, energía, procesos industriales, combustión y sostenibilidad. Para la revisión se consideraron artículos científicos publicados entre 2021 y 2026, tanto en inglés como en español. Con esta delimitación se buscó trabajar con información reciente y que tuviera relación directa con el tema de estudio.

1.2.4 Tercera etapa – Combinación de palabras clave

Para definir las palabras clave se tomaron como referencia los principales conceptos que forman parte de la investigación: generación de vapor, calderas industriales, eficiencia energética, diagnóstico energético, consumo de combustible, gases de combustión, pérdidas térmicas, purgas, economizadores e indicadores EnPIs.

En la Tabla 3 se presenta la ecuación de búsqueda utilizada, donde se combinaron estos términos mediante operadores booleanos para localizar documentos relacionados con la eficiencia energética en sistemas de vapor. De los documentos encontrados se tomaron solamente aquellos publicados entre 2021 y 2026.

Tabla 3. Ecuación de búsqueda Scopus.

Fuentes	Descripción de exploración
---------	----------------------------

Scopus	TITLE-ABS-KEY (("steam generation" OR "steam generation system*" OR "steam system*" OR "steam boiler*" OR boiler* OR "industrial boiler*" OR "steam plant*" OR "boiler system*") AND ("energy efficiency" OR "energy performance" OR "thermal efficiency" OR "boiler efficiency" OR "energy assessment" OR "energy evaluation" OR "energy diagnosis" OR "energy audit" OR "specific fuel consumption" OR "fuel consumption" OR "energy intensity" OR "energy performance indicator*" OR EnPI) AND (combustion OR "flue gas" OR "stack loss*" OR "heat loss*" OR blowdown OR "steam trap*" OR insulation OR economizer OR "heat recovery")) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE,"ar")) AND (PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2027).
--------	--

Nota. Elaborado por la autora.

1.2.5 Cuarta etapa – Criterios de inclusión y exclusión

Luego de establecer la ecuación de búsqueda, se definieron criterios de inclusión y exclusión para asegurar que los artículos seleccionados fueran pertinentes al diagnóstico energético de sistemas de vapor.

La Tabla 4 establece una depuración documental orientada a la pertinencia técnica de los artículos seleccionados, se priorizaron artículos indexados, publicados entre 2021 y 2026, relacionados con calderas, sistemas de vapor, indicadores, balances, pérdidas, recuperación de calor y eficiencia energética.

Tabla 4. *Criterios de inclusión y exclusión de artículos científicos.*

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos científicos publicados entre 2021 y 2026.	Documentos publicados antes de 2021.
Investigaciones indexadas en Scopus, en idioma inglés o español.	Blogs, notas, documentos sin revisión académica o material no científico.
Estudios sobre calderas, generación de vapor, eficiencia o diagnóstico energético industrial.	Estudios sin relación directa con vapor industrial, combustión o calderas.
Documentos que reporten indicadores, pérdidas térmicas, balances energéticos, consumo de combustible o recuperación de calor.	Trabajos sin metodología técnica verificable o sin aplicación al objeto de estudio.
Investigaciones con aportes metodológicos aplicables al caso de estudio.	Documentos duplicados o no disponibles para análisis.

Nota. Elaborado por la autora.

1.2.6 Quinta etapa – estructuración SPICE y análisis bibliométrico

La estructuración de la revisión se apoyó en el método SPICE, debido a que permite organizar el escenario, la población, la intervención, la comparación y la evaluación. En esta investigación, SPICE se utiliza como guía para ordenar la pregunta

de revisión y asegurar que la búsqueda bibliográfica se relacione con el diagnóstico del sistema de vapor.

La Tabla 5 muestra que el método SPICE ayuda a vincular la búsqueda bibliográfica con las variables reales del diagnóstico energético. De esta forma, la revisión se enfoca en estudios que aportan herramientas para analizar consumo, vapor, combustión, emisiones y pérdidas.

Tabla 5. *Método SPICE aplicado a la revisión literaria.*

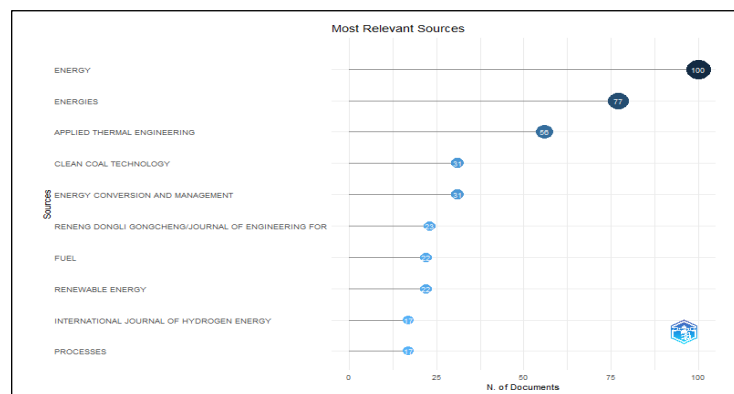
Letra	Significado	Aplicación en la investigación
S	Escenario.	Sistemas industriales de generación de vapor en refinerías o procesos productivos.
P	Población.	Calderas industriales, sistema de vapor y equipos asociados.
I	Intervención.	Diagnóstico, evaluación o análisis de eficiencia energética.
C	Comparación.	Condición operativa actual, línea base energética o desempeño de referencia.
E	Evaluación.	Eficiencia térmica, consumo específico, emisiones, pérdidas e indicadores EnPIs.

Nota. Elaborado por la autora.

El resultado del análisis bibliométrico se muestra en la Figura 2. Esta información permite observar de manera cuantitativa cómo se comporta el corpus analizado y sirve como complemento para la revisión de los artículos que fueron seleccionados.

En la Figura 2 se puede observar que la revista Energy presenta la mayor cantidad de publicaciones, con 100 artículos. Después aparecen Energies con 77 y Applied Thermal Engineering con 56. Estos resultados muestran que una parte importante de las investigaciones sobre eficiencia energética, transferencia de calor, combustión y optimización de sistemas térmicos se publica en revistas especializadas en temas de energía e ingeniería térmica.

Figura 2. *Fuentes científicas más relevantes del corpus analizado.*

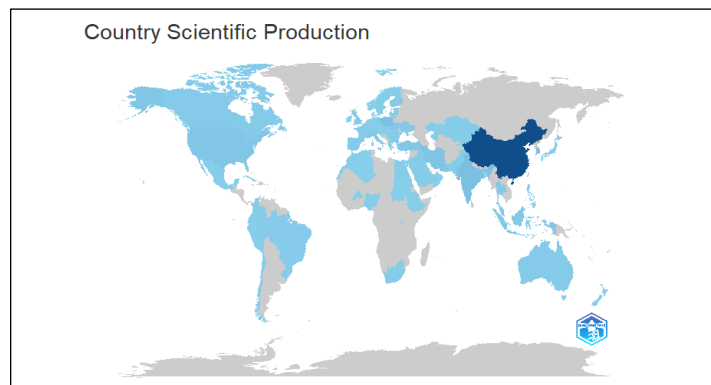


Nota. Elaborado por la autora.

En la Figura 3 se presenta el resultado bibliométrico relacionado con la producción científica por país. Este análisis permite revisar cuantitativamente cómo se distribuyen las publicaciones que forman parte del corpus seleccionado.

En la Figura 3 se observa una diferencia considerable entre China y los demás países, ya que registra 1110 publicaciones. Luego se encuentran Polonia con 118, India con 115 y Corea del Sur con 113. Esta distribución permite ver que el tema ha sido estudiado principalmente en países donde existe una alta actividad industrial y un uso intensivo de sistemas energéticos.

Figura 3. *Producción científica por país.*

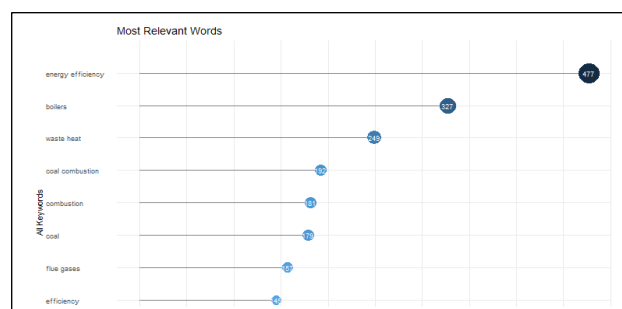


Nota. Elaborado por la autora.

La Figura 4 presenta otro de los resultados obtenidos mediante el análisis bibliométrico. En este caso se revisan los términos que aparecen con mayor frecuencia dentro del corpus y que permiten reconocer los temas que predominan en la literatura seleccionada.

En la Figura 4, “energy efficiency” aparece como el término con mayor frecuencia, alcanzando 477 ocurrencias. Le siguen “boilers” con 327 y “waste heat” con 249. La presencia repetida de estos términos muestra que la eficiencia energética, las calderas y el aprovechamiento del calor residual forman parte de los principales temas considerados dentro de la revisión.

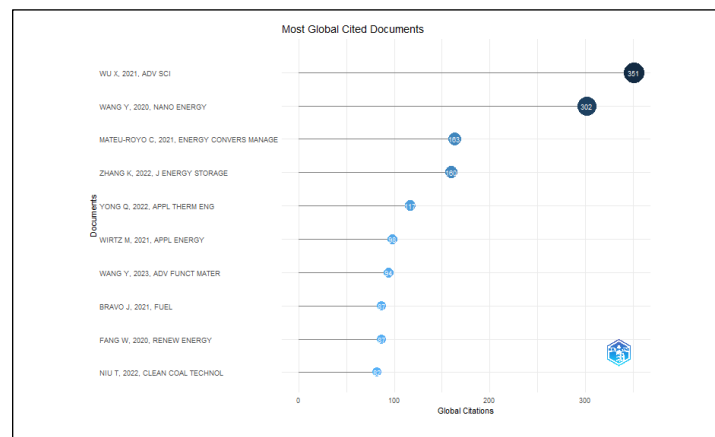
Figura 4. *Palabras más frecuentes en el corpus.*



Nota. Elaborado por la autora.

La Figura 5 reúne los documentos que alcanzaron más citas a nivel global. Aunque permite tener una referencia del impacto de esos trabajos en temas de eficiencia energética y sistemas térmicos, para construir los antecedentes de esta investigación se mantuvo el criterio de trabajar con estudios publicados entre 2021 y 2026.

Figura 5. Documentos con mayor número de citas globales.

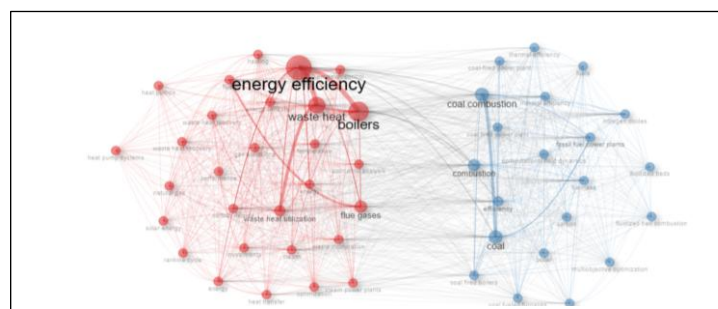


Nota. Elaborado por la autora.

La Figura 6 presenta la relación existente entre los principales términos encontrados dentro del corpus bibliométrico. Con esta representación se puede revisar cómo se conectan los temas que aparecen con mayor frecuencia dentro de los documentos analizados.

En la Figura 6, “energy efficiency” aparece como el nodo principal de la red y mantiene relación con términos como “boilers”, “waste heat” y “flue gases”. Esta conexión muestra que el estudio de la eficiencia energética en calderas también se encuentra relacionado con la combustión, la recuperación de calor y las pérdidas asociadas a los gases de salida.

Figura 6. *Red de coocurrencia.*

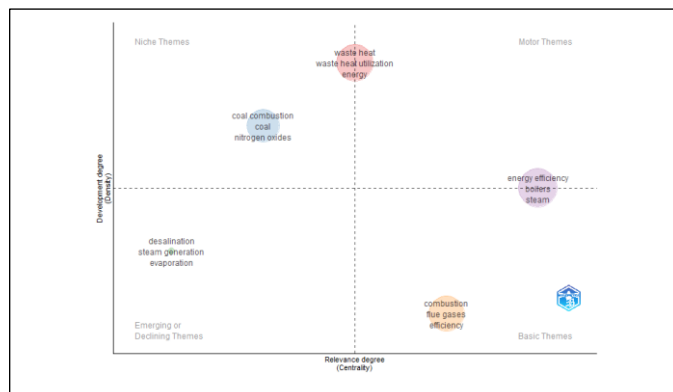


Nota. Elaborado por la autora.

La Figura 7 corresponde al resultado del agrupamiento temático obtenido a partir del corpus analizado. Esta representación ayuda a reconocer qué temas aparecen vinculados entre sí dentro de las investigaciones revisadas.

En la Figura 7 se observa un clúster principal relacionado con el aprovechamiento del calor residual, donde aparecen términos como “waste heat”, “exergy”, “economic analysis” e “investments”. Esto muestra que las mejoras aplicadas a sistemas de generación de vapor no se analizan únicamente por su rendimiento térmico, sino que también se considera la parte económica antes de plantear una alternativa.

Figura 7. Agrupamiento por acoplamiento temático.



Nota. Elaborado por la autora.

La Figura 8 corresponde a la nube de palabras obtenida con los términos del corpus. En ella se puede reconocer de forma rápida cuáles palabras tuvieron una mayor presencia durante el análisis de los documentos.

Dentro de la Figura 8 sobresalen “energy efficiency”, “boilers” y “waste heat”. Que estos términos aparezcan con mayor presencia coincide con lo encontrado anteriormente en la frecuencia de palabras y también con los temas que se tomaron como referencia para orientar el diagnóstico energético del estudio.

Figura 8. Nube de palabras.

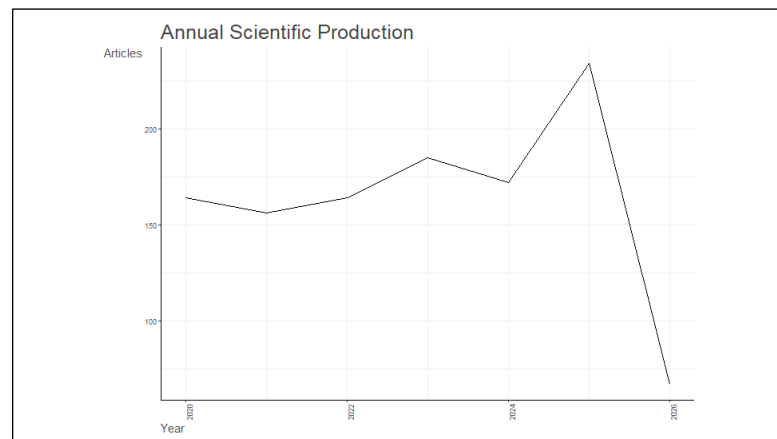


Nota. Elaborado por la autora.

La Figura 9 muestra cómo ha variado la cantidad de publicaciones relacionadas con el tema durante los años analizados. Este resultado permite observar el comportamiento reciente de la producción científica dentro del corpus bibliométrico.

En la Figura 9 se aprecia un aumento de las publicaciones recientes relacionadas con eficiencia energética en sistemas industriales, llegando a un máximo de 234 documentos en 2025. Para 2026 se observa una cantidad menor, pero este resultado no puede considerarse como una disminución definitiva debido a que el año todavía no había finalizado cuando se realizó el análisis.

Figura 9. *Producción científica anual.*



Nota. Elaborado por la autora.

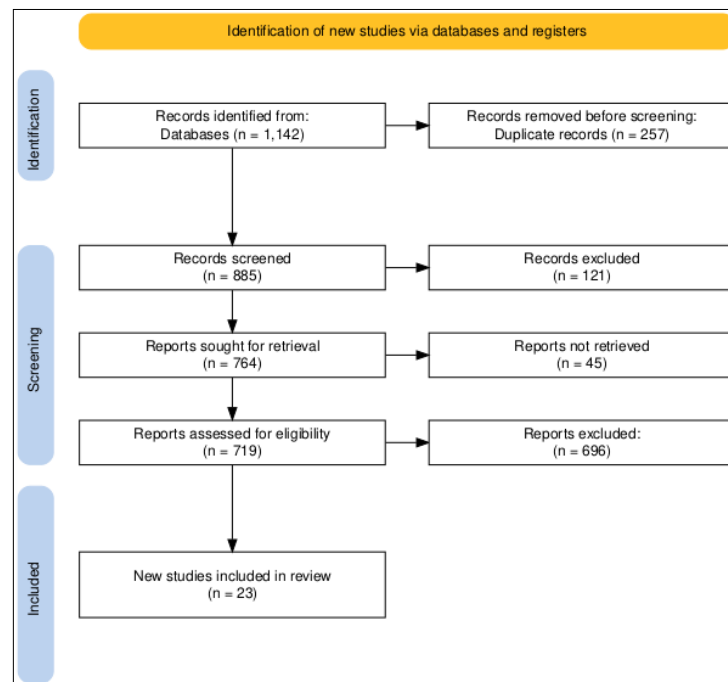
1.2.7 Sexta etapa – Análisis de documentación seleccionada

La revisión literaria partió de un total de 1142 publicaciones científicas encontradas mediante la ecuación de búsqueda aplicada en Scopus. Después se eliminaron 257 registros duplicados, por lo que quedaron 885 documentos para iniciar el proceso de cribado. En esta etapa se revisaron los títulos y se descartaron 121 estudios que no tenían relación directa con eficiencia energética en calderas, sistemas de vapor, combustión o recuperación de calor, quedando 764 documentos. Posteriormente se analizaron los resúmenes y abstracts, donde se excluyeron 719 trabajos por presentar baja pertinencia temática o poca relación con el objeto de estudio. Finalmente, 45 artículos fueron revisados a texto completo y de ellos se seleccionaron 23 investigaciones relacionadas directamente con diagnóstico energético, indicadores, recuperación de calor, combustión, pérdidas térmicas y análisis técnico-económico.

La Figura 10 presenta cómo se fue reduciendo la cantidad de documentos desde la búsqueda inicial hasta llegar a los artículos seleccionados para la investigación. Con este

procedimiento se puede observar de manera clara qué filtros fueron aplicados durante la revisión y cómo se llegó al conjunto final de fuentes utilizadas en el marco teórico.

Figura 10. *Revisión literaria (PRISMA Flow Diagram).*



Nota. Elaborado por la autora a partir de los resultados del análisis PRISMA (2025).

Después de definir el corpus final se elaboró una matriz con los artículos científicos seleccionados. En esta matriz cada estudio se organizó según autor, metodología utilizada, herramienta principal y aporte que representa para la investigación.

La Tabla 6 muestra investigaciones recientes relacionadas con sistemas de vapor, calderas industriales, recuperación de calor, análisis de pérdidas, monitoreo energético y evaluación técnico-económica. Esta matriz reconoce los aportes que sustentan la selección de herramientas para el diagnóstico energético aplicado a la caldera 3.

Tabla 6. *Matriz de artículos científicos.*

Nº	Título de la investigación	Autor	Tipo de estudio	Metodología	Herramientas utilizadas	Objetivo del estudio
D1	Impact of water consumption on the economic viability of energy efficiency improvements for industrial steam systems.	(Eric Niemeyer et al., 2023).	Cuantitativo.	Modelación tecnoeconómica de sistema de vapor.	Modelo de sistema de vapor, datos de auditorías energéticas, métrica CCEW.	Evaluar el efecto del ahorro de agua sobre la viabilidad económica de medidas de eficiencia energética en sistemas de vapor industriales.
D2	Selection of priority energy efficiency practices for industrial steam boilers by PROMETHEE decision model.	(Yunus Emre Demirel et al., 2021)	Cuantitativo.	Toma de decisión multicriterio.	PROMETHEE, criterios técnicos, económicos y ambientales.	Priorizar prácticas de eficiencia energética aplicables a calderas industriales de vapor.
D3	Green Industry: Energy Efficiency Improvement of Steam Generation in a Moroccan Plastic Recycling Industry.	(Batouta et al., 2025).	Cuantitativo.	Diagnóstico termoenergético de caso.	Benchmark, cuestionario de scoping, análisis termodinámico, plan de acción.	Identificar oportunidades de ahorro energético en la generación de vapor de una planta de reciclaje.
D4	Energy Efficiency Analysis and Energy-Saving Measures for the Steam System in a Cigarette Factory in Zhangjiakou.	(Wei Gao et al., 2024).	Cuantitativo.	Evaluación energética y exergética.	Modelo de aprovechamiento térmico, eficiencia térmica y exergética.	Evaluar la eficiencia del sistema de vapor e identificar medidas de ahorro energético.
D5	Overall performance of steam system used in garment industries in Bangladesh: a case study-based approach.	(Saha et al., 2021b).	Cuantitativo.	Evaluación del desempeño y optimización.	Cálculo de pérdidas de calor, algoritmo genético.	Evaluar el desempeño global de sistemas de vapor y optimizar parámetros operativos.
D6	Energy saving potential in steam systems: A techno-economic analysis of a recycling pulp and paper mill industry in Morocco.	(Ibn Batouta et al., 2024).	Cuantitativo.	Análisis tecnoeconómico de sistema de vapor.	Cuestionario de rating, análisis económico, enfoque de sistema.	Identificar oportunidades de ahorro energético en un sistema de vapor industrial.
D7	Energy Audit on Two 22-TPH Coal-fired Boilers of a Pineapple Processing Plant.	(Jay Nelson Corbita et al., 2024)	Cuantitativo.	Auditoría energética.	Pruebas de desempeño, método indirecto, análisis de pérdidas.	Determinar eficiencia, cuantificar pérdidas de calor e identificar medidas de conservación energética.
D8	Energy efficiency improvement for industrial boilers through a flue-gas condensing heat recovery system with nonlinear MPC approach.	(Soroush Rastegarpour et al., 2023).	Cuantitativo.	Modelación y control predictivo.	Modelo 1-D, NMPC, LMPC, PID, validación experimental.	Mejorar la eficiencia energética de calderas industriales mediante recuperación de calor y control avanzado.
D9	Flue Gas Recirculation in Steam Boilers: A Comprehensive Assessment Strategy for Energy Optimization and Efficiency Enhancement.	(Abdulwahab Alhashem et al., 2025).	Cuantitativo.	Evaluación termoenergética paramétrica.	Cálculo iterativo, análisis paramétrico, principios termodinámicos y de transferencia de calor.	Evaluar el efecto de la recirculación de gases en el desempeño térmico de calderas de vapor.
D10	Reducing Energy Losses of Steam Boilers Caused by Blowdown with Using the FMEA Method.	(Ceyda Kocabaş & Savaş, 2021).	Cuantitativo.	Análisis de riesgos y mejora de proceso.	FMEA, árbol de decisiones, análisis de retorno.	Reducir pérdidas de energía por purga de fondo en calderas de vapor.
D11	Operational Control of the Energy Performance of a Water-Tube Boiler Using Intelligent Monitoring of Operating Variables and Parameters.	(M. V. Chamorro et al., 2024).	Cuantitativo.	Monitoreo y control operacional.	Línea base, línea meta, monitoreo online, indicadores de desempeño.	Controlar el desempeño energético de una caldera acuotubular con monitoreo inteligente.

D12	Investigation of the Performance of a 660-MW Supercritical Boiler in Terms of NO _x Emission.	(Gavirineni & Gundabattini, 2022).	Cuantitativo.	Evaluación experimental de combustión.	Ensayos en planta, análisis de aire secundario, medición de Nox.	Reducir emisiones de NO _x y mejorar la eficiencia térmica mediante optimización de la distribución de aire.
D13	Exergy analysis of the boiler in phase 3 of the Khartoum North power plant.	(Abuelnuor A A Abuelnuor et al., 2024).	Cuantitativo.	Análisis energético exergético.	Balance de energía, balance de exergía.	Identificar los principales focos de pérdida energética y exergética en una caldera de potencia.
D14	Energy analysis and energy efficiency improvement strategies of bagasse boiler based on test data.	(Qianci Mo et al., 2022).	Cuantitativo.	Diagnóstico basado en datos de prueba.	Ensayos de eficiencia, análisis de factores, datos de campo.	Analizar la eficiencia de calderas bagaceras y proponer estrategias de mejora.
D15	Economic feasibility of retrofitting blowdown heat recovery system using steam dryer to lignite-fired power plant for reduced fuel consumption.	(Chantasiriwan, 2023).	Cuantitativo.	Simulación y factibilidad económica.	Simulación de sistema, análisis de payback.	Evaluar la viabilidad económica de recuperar calor de blowdown para reducir consumo de combustible.
D16	Energy and economic assessments of waste heat recovery by designs of economizer, condensing economizer and air preheater.	(Meryem Terhan et al., 2023).	Cuantitativo.	Evaluación energética económica y por escenarios.	Análisis de combustión, economizer, air preheater, escenarios de recuperación.	Evaluar alternativas de recuperación de calor residual de gases de combustión.
D17	Experimental investigation on the performance of a boiler system with flue gas dehumidification and combustion air humidification.	(Liao et al., 2022).	Experimental.	Ensayo experimental de recuperación de calor.	Banco experimental, medición térmica, humidificación del aire.	Evaluar experimentalmente un sistema de recuperación total de calor en caldera.
D18	Evaluation of the energy efficiency improvement potential through back-end heat recovery in the kraft recovery boiler.	(Jussi Saari et al., 2021).	Cuantitativo.	Simulación energética.	IPSEpro, simulación de ciclo de vapor y recuperación.	Evaluar el potencial de mejora energética mediante recuperación de calor en una recovery boiler.
D19	Performance research and application of the vapor pump boiler equipped with flue gas recirculation system.	(Men et al., 2022).	Cuantitativo.	Aplicación práctica y análisis de desempeño.	Sistema de recirculación de gases, evaluación de sistema.	Mejorar la eficiencia térmica y reducir emisiones en una caldera con bomba de vapor.
D20	Performance analysis of power plant designed with a carbon capture unit: study of an oil refinery.	(Shamsaei et al., 2023).	Cuantitativo.	Simulación técnico-económica.	Relaciones matemáticas, simulación en software, análisis operativo.	Evaluar el efecto de una unidad de captura de carbono en el desempeño de una planta en refinería.
D21	Modification of the flow pattern in ducts outlet and economizer chamber for optimization of existing high pressure boilers to improve boiler performance.	(Behzadi & Abbasian Arani, 2025).	Cuantitativo.	Modelación CFD y optimización.	Fluent, cálculos térmicos y de tiro.	Mejorar el desempeño de calderas de alta presión mediante modificación del patrón de flujo y economizador.
D22	A Hybrid Soft Sensor Model for Measuring the Oxygen Content in Boiler Flue Gas.	(Yonggang Wang et al., 2024).	Cuantitativo.	Modelado predictivo con inteligencia artificial.	WOA-LSTM, LSSVM, PSO-LSTM.	Predecir el contenido de oxígeno en gases de combustión para mejorar control y eficiencia.
D23	Heat transfer performance analysis of steam boilers-fin and tube heat exchangers under varying geometric dimensions.	(Fasogbon et al., 2026).	Cuantitativo.	Modelación CFD y transferencia de calor.	COMSOL Multiphysics, modelos k-epsilon y k-omega.	Analizar el efecto de parámetros geométricos sobre el rendimiento térmico y recuperación de calor.

Nota. Elaborado por la autora.

Para organizar los aportes metodológicos de los artículos, se agruparon las investigaciones en enfoques principales. La Tabla 7 muestra esta clasificación y reconoce cuál metodología tiene mayor relación con el desarrollo del diagnóstico energético.

En la Tabla 7 se observa que el diagnóstico energético es el enfoque predominante y el más compatible con el trabajo. Esta metodología integra registros históricos, variables térmicas, indicadores y priorización de oportunidades dentro de una evaluación técnica ajustada al alcance del estudio.

Tabla 7. *Agrupación metodológica de los artículos seleccionados.*

Metodología principal	Investigaciones asociadas	Descripción	N
Diagnóstico energético.	D1, D3, D4, D5, D6, D7, D11, D14	Caracterización de consumo, pérdidas, línea base, variables operativas e indicadores de desempeño.	8
Optimización y control.	D2, D8, D9, D12, D19, D21, D22, D23	Modelos de priorización, control predictivo, simulación, optimización de combustión y transferencia de calor.	8
Monitoreo energético continuo.	D9, D11, D12, D17, D19, D22	Seguimiento de variables reales, combustión, gases, oxígeno, presión, temperatura y operación.	6
Gestión técnico-económica.	D1, D6, D15, D16, D18, D20	Análisis de costos, factibilidad, ahorro, recuperación de calor y soporte para decisiones.	6
Mejora continua y priorización.	D2, D10, D16	Jerarquización de causas, pérdidas, fallas y oportunidades de mejora mediante herramientas industriales.	3

Nota. Elaborado por la autora.

Además de las metodologías, se identificaron herramientas técnicas recurrentes.

La Tabla 8 presenta herramientas técnicas identificadas en la literatura y diferencia su aplicación dentro del estudio. Para el desarrollo de la investigación se utilizan de forma directa los registros históricos, fichas técnicas, indicadores EnPIs, análisis de flujo, encuesta estructurada, matriz GUT, MEASUR Tool y análisis económico. Las herramientas como PROMETHEE, FMEA o modelación avanzada se mantienen como antecedentes metodológicos cuando no son aplicadas en el caso de estudio.

Tabla 8. *Herramientas y técnicas identificadas en la literatura reciente.*

Herramienta o técnica	Investigaciones asociadas	Cantidad de uso	Aplicación en la tesis
Indicadores EnPIs, eficiencia térmica y consumo específico.	D4, D5, D7, D11, D12, D13, D14, D17, D22.	9.	Medir el desempeño energético de la caldera 3.
Registros históricos y datos operativos.	D1, D5, D7, D11, D12, D17, D19, D20, D22.	9.	Construir línea base y analizar comportamiento mensual.

Fichas técnicas y especificaciones de equipos.	D9, D15, D16, D18, D19, D21, D23.	7.	Registrar capacidad, presión, temperatura y parámetros de diseño.
Análisis de flujo del sistema de vapor.	D1, D3, D5, D6, D15, D16, D18.	7.	Representar fuel oil, agua, vapor, purgas, condensado y emisiones.
Priorización técnica.	D2, D10, D14, D16.	4.	La matriz GUT se aplica directamente; los otros métodos se mantienen como referencia.
Encuestas directas y cuestionarios técnicos.	D3, D6.	2.	Complementar el diagnóstico con percepción operativa.
Software especializado y modelación.	D8, D18, D20, D21, D23.	5.	MEASUR Tool se aplica como soporte computacional; otros softwares son referencia.

Nota. Elaborado por la autora.

Con el fin de evitar confusión entre herramientas revisadas y herramientas utilizadas, la Tabla 9 resume únicamente las técnicas aplicadas directamente en esta investigación. De esta manera, la tabla no presenta todas las herramientas encontradas en la literatura, sino aquellas que fueron empleadas en el diagnóstico energético y en la propuesta de optimización de la caldera 3.

Tabla 9. *Frecuencia de uso de herramientas y técnicas seleccionadas.*

Herramienta aplicada	Cantidad de uso	Uso en el estudio
Registros históricos.	9.	Línea base mensual de fuel oil, vapor, presión, temperatura y condensado.
Indicadores EnPIs.	9.	Consumo específico, vaporización, eficiencia, costo e índice SO ₂ /límite.
Fichas técnicas.	7.	Caracterización de la caldera 3 y sus equipos auxiliares.
Análisis de flujo.	7.	Entradas, salidas, pérdidas y retorno de condensado del sistema.
Likert y SPSS.	5.	Validez, confiabilidad, descriptivos y correlación de Pearson.
Matriz GUT.	4.	Priorización de condiciones críticas del diagnóstico.
MEASUR Tool.	2.	Modelación del escenario base y del escenario optimizado.
Análisis económico.	5.	Ahorro, inversión y retorno simple de la propuesta.

Nota. Elaborado por la autora.

1.3. Fundamentos teóricos

El sistema de generación de vapor reúne los equipos y las condiciones de operación necesarias para calentar el agua hasta obtener vapor que pueda utilizarse en los procesos industriales. Durante este proceso participan el combustible y su combustión, el

agua de alimentación, la presión y temperatura de trabajo, la transferencia de calor, las purgas, los gases que salen del sistema, el condensado que retorna y la cantidad de vapor requerida. Gao et al. (2024) indican que el desempeño de un sistema de vapor no debe revisarse únicamente desde la generación, sino también considerando las unidades que consumen calor, ya que el aprovechamiento energético depende de cómo se relacionan la producción, distribución y uso del vapor.

La eficiencia energética de una caldera permite conocer qué parte de la energía química contenida en el combustible termina siendo aprovechada como energía útil en el vapor producido. Esta relación permite revisar si el consumo de fuel oil mantiene correspondencia con la cantidad de vapor generado y con las condiciones reales en las que trabaja el equipo. Desde el punto de vista termodinámico, el rendimiento no depende solamente del combustible consumido, debido a que también intervienen las pérdidas que aparecen durante la combustión, la transferencia de calor y la salida de los gases. Abuelnuor et al. (2024) señalan que mediante el análisis energético y exergético se pueden diferenciar la energía que entra al sistema, la que realmente se aprovecha y aquella que se pierde durante el proceso.

La combustión corresponde al proceso donde el fuel oil libera la energía térmica necesaria para generar vapor. La forma en que se desarrolla puede estar relacionada con el poder calorífico, la viscosidad y atomización del combustible, el exceso de aire, la temperatura de los gases, el oxígeno residual y la propia composición del combustible. Estas variables no conviene analizarlas por separado, ya que varias de ellas pueden influir al mismo tiempo en el consumo de energía, en la estabilidad con la que trabaja la caldera y en las emisiones producidas. Wang et al. (2024) señalan que el contenido de oxígeno presente en los gases de combustión es una variable importante para conocer cómo se está desarrollando la combustión y el aprovechamiento energético del equipo.

Las pérdidas térmicas corresponden a la energía que durante el funcionamiento del sistema no llega a convertirse en vapor útil. Estas pérdidas pueden encontrarse en los gases de combustión, las purgas, superficies calientes, fugas, problemas de aislamiento, bajo retorno de condensado o condiciones de operación que no estén siendo controladas. Cuando estas pérdidas aumentan, la misma cantidad de combustible puede terminar produciendo menos vapor o generando un costo diferente. Kocabaş & Savaş (2021) señalan que las purgas también representan una pérdida de energía y dinero cuando su manejo no se mantiene dentro de valores adecuados.

Para conocer si la caldera mantiene un comportamiento parecido con el paso del tiempo se utiliza una línea base energética. Esta se obtiene a partir de los registros históricos disponibles, tomando datos de consumo de combustible, vapor producido, horas de operación, presión, temperatura y otras variables que intervienen en el equipo. Luego estos datos sirven para revisar si en determinados meses aparecen cambios respecto al comportamiento que normalmente presenta la caldera. Chamorro et al. (2024) utilizan este tipo de referencia junto con una línea meta para hacer seguimiento a las variables e indicadores durante la operación.

Los indicadores de desempeño energético permiten convertir los registros que se obtienen durante la operación en información que pueda ser comparada. En un sistema de vapor pueden relacionarse, por ejemplo, el consumo de fuel oil con el vapor producido, los costos, las emisiones y el retorno de condensado. Su utilidad está en reunir datos que por separado dicen poco y convertirlos en criterios que ayuden a revisar el rendimiento del equipo durante el periodo estudiado. Niemeyer et al. (2023) señalan que al evaluar mejoras en sistemas de vapor es necesario considerar conjuntamente el desempeño energético, los costos y el uso de los recursos.

Cuando dentro del estudio aparecen varias condiciones que necesitan atención, las herramientas de priorización ayudan a establecer cuáles conviene revisar primero. Para ordenarlas se pueden tomar en cuenta la gravedad, la frecuencia, el impacto y la tendencia de cada una. Estas herramientas sirven como apoyo y no reemplazan ni los indicadores ni el análisis térmico del sistema. Demirel et al. (2021) aplicaron una evaluación multicriterio para comparar prácticas de eficiencia energética en calderas industriales tomando en cuenta aspectos técnicos, económicos y ambientales.

En la Tabla 10 se muestran los indicadores que se van a calcular para analizar la caldera 3. Para hacerlo se requiere disponer de los valores de temperatura, presión, agua de alimentación, vapor producido, consumo de fuel oil, poder calorífico inferior (PCI), costos y emisiones.

Tabla 10. *Indicadores técnicos requeridos para el diagnóstico energético.*

Indicador	Fórmula general	Interpretación
Consumo específico.	$\frac{\text{Fuel oil consumido}}{\text{vapor producido}}$	Menor valor indica mejor aprovechamiento del combustible.
Vaporización específica.	$\frac{\text{Vapor producido}}{\text{fuel oil consumido}}$	Mayor valor indica mayor generación por unidad.

Eficiencia térmica.	$\frac{\text{Energía útil del vapor}}{\text{energía del combustible} \times 100}$	Mide el rendimiento energético de la caldera.
Índice SO ₂ /límite.	$\frac{\text{SO}_2 \text{ medido}}{\text{límite permisible}}$	Valor mayor a 1 indica desviación ambiental.
Costo específico de vapor.	$\frac{\text{Costo de fuel oil}}{\text{vapor producido}}$	Evalúa el impacto económico del consumo.
Retorno de condensado.	$\frac{\text{Condensado retornado}}{\text{vapor generado} \times 100}$	Mayor retorno reduce energía requerida para calentar agua.

Nota. Elaborado por la autora.

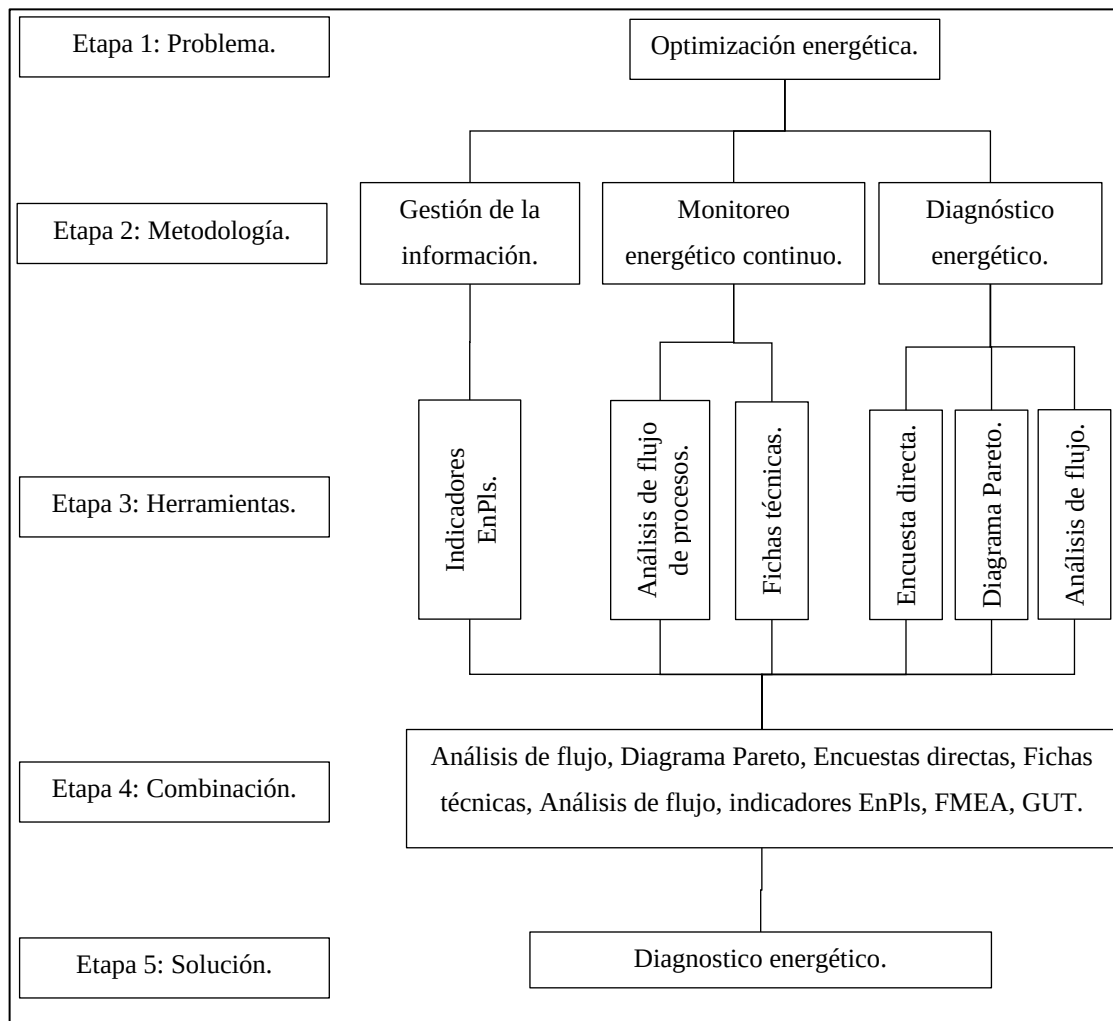
1.4. Protocolo de investigación.

El protocolo de investigación se fue definiendo después de revisar la literatura y establecer con claridad qué parte del sistema iba a estudiarse. A partir de eso se organizó el camino que seguiría el trabajo, desde el problema identificado hasta la propuesta de optimización energética. La idea fue que cada herramienta utilizada tuviera una función dentro del estudio y no apareciera solamente como un recurso adicional. Por esta razón, el protocolo se dirige al diagnóstico energético de la caldera 3.

El protocolo se estructuró en cinco partes necesarias para desarrollar la investigación: problema, metodología, herramientas, combinación y solución. El punto de partida fue la situación identificada en la caldera 3 y la necesidad de conocer mejor su comportamiento energético. Para esto se estableció un diagnóstico energético apoyado en registros históricos, fichas técnicas, análisis de flujo, indicadores EnPIs, encuesta, GUT, Pareto y FMEA. La información obtenida mediante estas herramientas se revisa junto con los datos disponibles y los criterios relacionados con la operación del equipo. Con lo encontrado en este análisis se define finalmente el plan de optimización energética, tomando como base los datos obtenidos durante el estudio.

En la Figura 11 se muestra la secuencia que sigue la investigación. El proceso comienza con la identificación del problema energético, luego pasa al diagnóstico y a la aplicación de las herramientas utilizadas para medir y priorizar las condiciones encontradas. Finalmente, con la información obtenida se plantea el plan de optimización energética. De esta manera, el trabajo se mantiene orientado hacia resultados que puedan comprobarse.

Figura 11. *Protocolo del ciclo de diseño metodológico del diagnóstico energético.*



Nota. Elaborado por la autora.

1.5. Discusión del estado del arte

Al revisar los estudios se puede ver que no todos analizan el sistema desde el mismo punto. En algunos casos la atención se coloca directamente sobre la caldera y sobre datos relacionados con la combustión, entre ellos el oxígeno de los gases, el exceso de aire y la temperatura de chimenea. En otros trabajos el análisis abarca más partes del sistema y también se revisan la distribución del vapor, su consumo, el retorno de condensado y la forma en que se aprovecha el calor. Wang et al. (2024) se ubican dentro del primer enfoque porque concentran su análisis en la estimación del oxígeno de los gases de combustión, mientras que Gao et al. (2024) consideran también las unidades que consumen calor dentro del sistema. Más que una contradicción, esta diferencia muestra cómo ha cambiado el análisis de calderas, pasando de estudiar solamente el equipo a relacionarlo con el sistema térmico en el que funciona.

También existen diferencias en las soluciones que plantean los estudios. Algunos trabajos se orientan directamente hacia tecnologías para recuperar calor residual, como economizadores, precalentadores de aire o intercambiadores condensantes. Otros consideran que antes de definir una mejora es necesario conocer primero cómo está funcionando el sistema, construir una línea base y calcular indicadores. Rastegarpour et al. (2023) muestran el potencial de recuperar calor de los gases de combustión mediante control predictivo, mientras que Chamorro et al. (2024) se enfocan en el control operacional utilizando línea base, línea meta e indicadores de desempeño. Para esta investigación, esta diferencia es importante porque permite evitar que se proponga desde el inicio una solución tecnológica para la caldera 3 sin haber revisado primero sus condiciones reales de operación.

En varios de los trabajos recientes también se utilizan modelos predictivos y herramientas inteligentes para revisar lo que ocurre durante la combustión. Con estas herramientas es posible estimar algunas variables y tener un mayor control de la operación, pero para utilizarlas se necesita contar con información suficiente y con instrumentos que entreguen datos confiables de manera continua. Esto puede ser una limitación cuando los registros se encuentran dispersos o cuando todavía no se han definido indicadores para cada equipo. En ese caso resulta necesario comenzar organizando la información disponible, establecer una línea base y obtener indicadores que permitan conocer primero cómo está trabajando la caldera. Por eso, en la caldera 3 se parte del diagnóstico energético antes de considerar herramientas de automatización o modelos más avanzados.

Uno de los aspectos que todavía falta estudiar con mayor detalle es el comportamiento individual de cada caldera cuando la información de operación se encuentra registrada por separado. En estos casos puede existir información sobre combustible, vapor, emisiones, costos y mantenimiento, pero sin una referencia común que permita analizarla en conjunto. La literatura presenta diferentes métodos para estudiar calderas, recuperar calor, revisar la combustión y priorizar mejoras, pero no se encontró una evaluación energética dirigida específicamente a la caldera 3 de la Planta Generación de la Refinería La Libertad. A partir de esta ausencia se plantea la necesidad de realizar un diagnóstico propio que tome en cuenta las condiciones reales de esta unidad.

De esta manera, la investigación toma de los estudios revisados tres aspectos principales: medir el desempeño mediante indicadores, revisar la combustión y las emisiones junto con las variables de operación, y ordenar las oportunidades de mejora

utilizando criterios técnicos. A diferencia de otros trabajos que parten de una tecnología ya definida, en este caso primero se realiza el diagnóstico energético de la caldera 3. Así, las posibles acciones de optimización se plantean a partir de los resultados encontrados y no desde supuestos establecidos antes de realizar el análisis.

1.6. Estado conceptual

El estado conceptual reúne los términos técnicos que sostienen la investigación. Cada concepto se vincula con su aplicación directa en el diagnóstico energético de la caldera 3, como se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. *Estado conceptual de la investigación.*

Concepto	Descripción	Aplicación en el estudio
Consumo energético.	Cantidad de energía utilizada por un sistema o equipo durante un periodo determinado.	Se relaciona con el fuel oil consumido y la producción de vapor de la caldera 3.
Fuel oil.	Combustible pesado empleado en calderas industriales, su calidad, poder calorífico, viscosidad y contenido de azufre pueden incidir en el desempeño energético y ambiental.	Evalúan el consumo energético, costos y comportamiento de SO ₂ .
Eficiencia energética.	Capacidad del sistema para transformar la energía del combustible en vapor útil con el menor nivel posible de pérdidas.	Se mide mediante indicadores de desempeño energético.
Sistema de generación de vapor.	Conjunto de procesos y equipos que transforman agua y energía térmica en vapor para uso industrial.	Se delimita a la caldera 3 y sus variables asociadas.
Línea base energética.	Referencia histórica del desempeño energético de la caldera.	Compara meses, identificar desviaciones y orientar mejoras.
Indicadores EnPIs.	Medidas cuantitativas utilizadas para controlar desempeño energético.	Consumo específico, eficiencia térmica, costo por vapor y SO ₂ /límite.
Registros históricos.	Datos documentales de operación, consumo, emisiones, mantenimiento y costos.	Base para el análisis mensual del equipo.
Fichas técnicas.	Documentos que registran capacidades, presión, temperatura, combustible y límites de operación.	Caracteriza técnicamente la caldera 3.
Diagrama de Pareto.	Herramienta de priorización basada en frecuencia o impacto.	Identifica condiciones con mayor prioridad técnica.
Matriz GUT.	Herramienta que prioriza problemas mediante gravedad, urgencia y tendencia.	Puede jerarquizar condiciones críticas del diagnóstico.

FMEA.	Método de análisis de modos y efectos de falla.	Logra evaluar fallas potenciales y su impacto en eficiencia y continuidad.
Encuesta complementaria.	Instrumento aplicado al personal técnico u operativo para recoger criterios de operación.	Complementa la interpretación de registros y oportunidades de mejora.

Nota. Elaborado por la autora.

Generalidades de la empresa

La Refinería La Libertad forma parte de EP Petroecuador y está ubicada en el cantón La Libertad, provincia de Santa Elena, Ecuador. En sus instalaciones se desarrollan actividades relacionadas con refinación, generación de vapor, combustión, calentamiento y suministro de energía para apoyar las operaciones de la refinería. Dentro de esta organización funcionan áreas como Planta Cautivo, Planta Refinería y Planta Generación.

Para esta investigación el análisis se concentra únicamente en la Planta Generación y, dentro de ella, en la caldera 3. En los informes técnicos este equipo también aparece identificado como parte de la Planta Eléctrica o Planta Generación. La caldera utiliza fuel oil como combustible y pertenece al sistema encargado de generar vapor en la Refinería La Libertad.

Figura 12. *Logotipo institucional de EP Petroecuador.*



Nota. Emitido por la empresa.

Misión

La misión institucional de EP Petroecuador consiste en maximizar de manera sustentable el valor de los recursos energéticos para beneficio de la sociedad ecuatoriana. En relación con esta investigación, dicha misión se vincula con la necesidad de mejorar

el uso de combustibles y fortalecer el desempeño energético de los sistemas térmicos de la Refinería La Libertad.

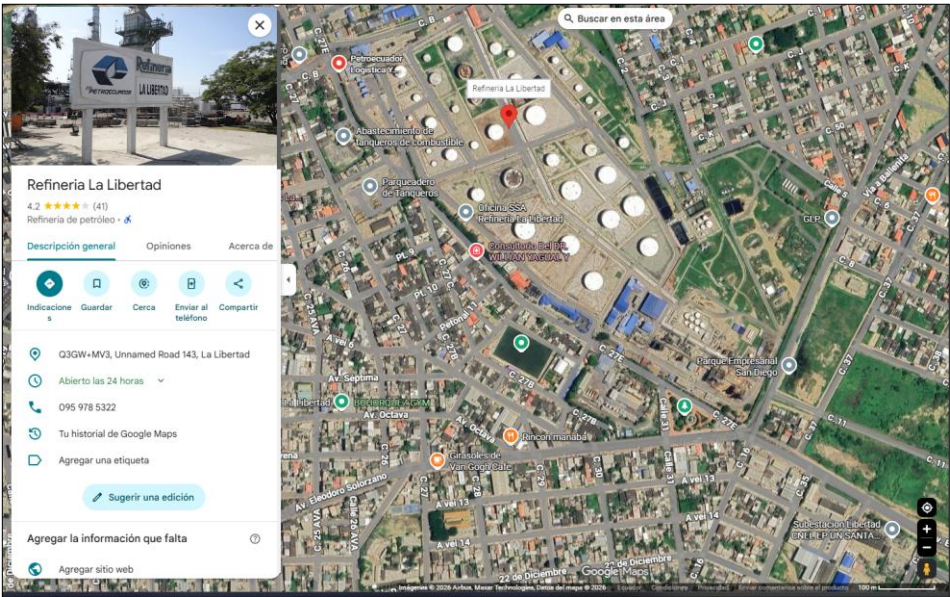
Visión

La visión institucional de EP Petroecuador se orienta a ser una empresa referente a nivel regional, reforzando la seguridad, eficiencia y desempeño energético con criterios de transparencia, probidad y compromiso social. Esta visión se relaciona con el propósito del estudio, debido a que la evaluación energética de la caldera 3 identifica oportunidades de mejora técnica, operativa, económica y ambiental.

Ubicación y localización de la empresa

La Refinería La Libertad está ubicada en el cantón La Libertad, provincia de Santa Elena, Ecuador. Desde esta instalación se desarrollan actividades relacionadas con refinación, generación de vapor, combustión y suministro de energía para los diferentes procesos industriales.

Figura 13. Localización de la Refinería La Libertad.



Nota. Adaptado de Google Maps o información institucional.

Tabla 12. Información general de ubicación de la Refinería La Libertad.

Elemento	Descripción
Empresa.	EP Petroecuador
Instalación.	Refinería La Libertad.

Provincia.	Santa Elena.
Cantón.	La Libertad.
Área de estudio.	Planta Generación.
Unidad técnica.	Caldera 3.
Periodo de análisis.	2025-2026.

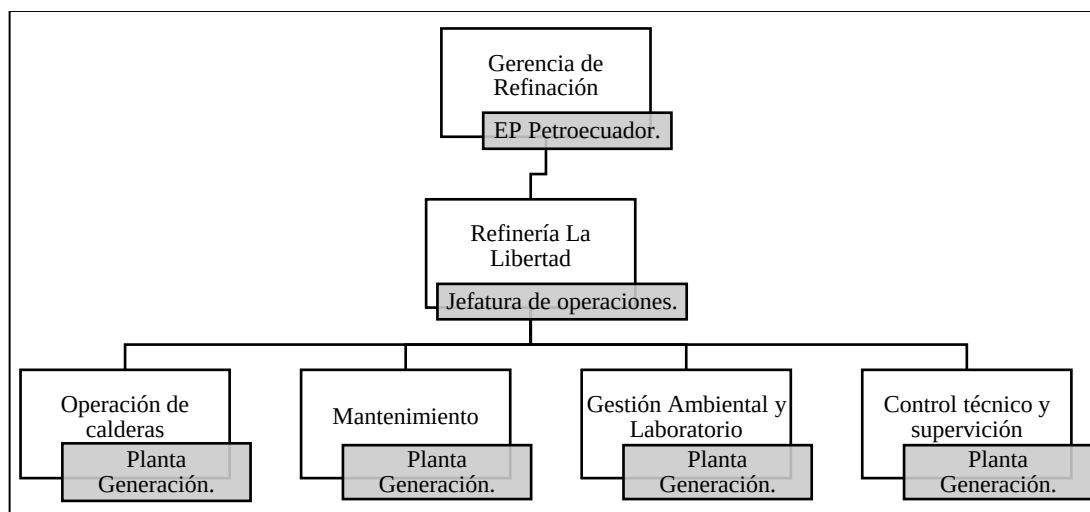
Nota. Elaborado por la autora.

Organización de la empresa

La Refinería La Libertad dispone de varias áreas para desarrollar sus operaciones, entre ellas refinación, generación, mantenimiento, seguridad, ambiente y laboratorio. Para este estudio se trabaja principalmente con la Planta Generación, debido a que allí se encuentra la caldera 3. En esta misma área se concentran o se obtienen los registros utilizados en el diagnóstico, como consumo de fuel oil, producción de vapor, emisiones y mantenimiento.

La Figura 14 presenta cómo se relaciona la Refinería La Libertad con la Planta Generación y las áreas que intervienen en el estudio. A partir de esta organización se pueden reconocer las fuentes de información necesarias para el diagnóstico energético, entre ellas operación, mantenimiento, laboratorio ambiental, supervisión y control técnico.

Figura 14. Organigrama del área vinculada con el estudio.



Nota. Elaborado por la autora con base en la estructura operativa del estudio.

Producción que se realiza en la empresa

La Refinería La Libertad realiza actividades industriales vinculadas con el procesamiento de hidrocarburos y con el suministro de energía que necesitan sus

diferentes operaciones. Dentro de este conjunto de procesos, la generación de vapor tiene una función importante porque permite atender actividades que requieren energía térmica, calentamiento, funcionamiento de equipos y continuidad de las unidades productivas.

En la Planta Generación, la caldera 3 utiliza fuel oil para producir el vapor requerido por la refinería. Este vapor forma parte del soporte energético de las operaciones, por lo que la manera en que funciona la caldera también se relaciona con el consumo de combustible, los costos de operación y las condiciones ambientales asociadas a esta fuente fija de combustión.

Descripción general del proceso de generación de vapor

El proceso comienza con el ingreso de fuel oil al sistema de combustión de la caldera. Antes de quemarse, el combustible pasa por un acondicionamiento, luego es impulsado y atomizado para facilitar su combustión dentro del hogar. El calor producido durante esta etapa se transmite al agua de alimentación por medio de las superficies de intercambio térmico, hasta generar el vapor que se utiliza en los procesos industriales. Como resultado de la combustión también se producen gases que salen por la chimenea y son revisados mediante mediciones ambientales.

Tabla 13. Descripción del proceso de generación de vapor en la caldera 3.

Etapas	Descripción	Variable asociada
1. Suministro de fuel oil.	Ingreso del combustible hacia el sistema de combustión.	Consumo de fuel oil.
2. Acondicionamiento del combustible.	Precalentamiento, bombeo y atomización para favorecer la combustión.	Viscosidad, presión y temperatura del combustible.
3. Combustión.	Liberación de energía térmica dentro del hogar de la caldera.	O ₂ , CO, NO _x , SO ₂ , exceso de aire.
4. Transferencia de calor.	Paso de energía térmica hacia el agua de alimentación.	Temperatura, presión, eficiencia térmica.
5. Generación de vapor.	Producción de vapor útil para el sistema industrial.	Vapor producido, presión y temperatura.
6. Distribución de vapor.	Envío del vapor hacia los puntos de consumo.	Demanda de vapor, pérdidas, fugas.
7. Retorno de condensado.	Recuperación parcial del condensado hacia el sistema.	Retorno de condensado, temperatura de agua.
8. Evacuación de gases.	Salida de gases de combustión por chimenea.	CO, NO _x , SO ₂ y temperatura de gases.

Nota. Elaborado por la autora.

CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO

El marco metodológico define la forma en que se desarrollará la evaluación de la eficiencia energética de la caldera 3 de la Planta Generación de la Refinería La Libertad, ubicada en la provincia de Santa Elena, Ecuador. En esta parte se establecen el enfoque, diseño, método, población, muestra, variables, instrumentos, plan de recolección, procesamiento de datos e indicadores que se utilizarán para desarrollar el diagnóstico energético del equipo seleccionado.

El estudio toma únicamente a la caldera 3 como unidad de análisis. Para esto se trabaja con los registros disponibles de consumo de fuel oil, producción de vapor, presión, temperatura, agua de alimentación, emisiones, costos, horas de operación y mantenimiento, de manera que los datos puedan ser revisados durante el desarrollo de la investigación. Con esta información se construirá la línea base energética, se obtendrán los indicadores de desempeño y se tendrán los resultados necesarios para plantear técnicamente el plan de optimización energética.

Al revisar la literatura se encontró que el diagnóstico energético se ajusta al tipo de análisis que se necesita realizar en la caldera 3. Este permite trabajar con la información histórica que ya existe y relacionarla con lo que ocurre durante la operación del equipo. A partir de esos datos se puede establecer la línea base, calcular los indicadores y ordenar los problemas que vayan apareciendo durante el análisis. La información de la caldera será revisada y procesada antes de interpretar los resultados, sin realizar cambios directamente sobre su funcionamiento.

2.1. Enfoque de investigación

La investigación utilizó un enfoque mixto con predominio cuantitativo, porque el diagnóstico de la eficiencia energética de la caldera 3 se apoyó principalmente en registros históricos, variables operativas, consumo de fuel oil, producción de vapor, emisiones, costos, indicadores energéticos, resultados de la encuesta tipo Likert y modelación mediante MEASUR Tool. Con esta información cuantitativa fue posible medir el comportamiento energético del sistema de generación de vapor y revisar la relación existente entre las variables estudiadas.

La parte cualitativa se utilizó como complemento para interpretar los resultados obtenidos en la fase cuantitativa. Para esto se realizó una observación técnica focalizada

sobre prácticas de operación, mantenimiento, control de pérdidas, purgas, retorno de condensado y seguimiento de novedades operativas. De esta forma, el estudio no se quedó únicamente en el cálculo de indicadores, sino que también tomó en cuenta las condiciones técnicas que podían observarse durante el funcionamiento del sistema.

De acuerdo con Hernández Sampieri y Mendoza Torres (2023), los métodos mixtos permiten integrar información cuantitativa y cualitativa dentro de una misma investigación cuando ambos componentes guardan relación entre sí. En este estudio esa relación se trabajó de manera secuencial, debido a que primero se obtuvieron los resultados cuantitativos y luego estos sirvieron para orientar la interpretación cualitativa. Por esta razón, el enfoque utilizado corresponde a un diseño mixto explicativo secuencial (DEXPLIS).

2.2. Diseño de investigación

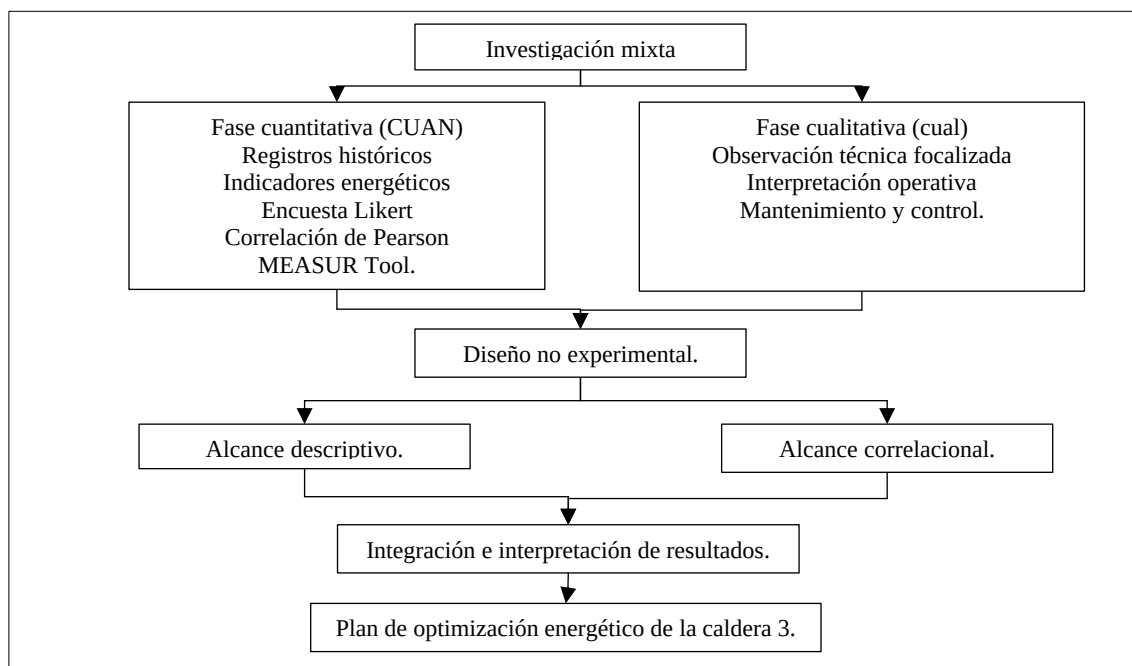
El diseño utilizado fue mixto explicativo secuencial, con predominio cuantitativo. En la primera fase se trabajó con los registros históricos correspondientes al periodo junio de 2025 a mayo de 2026, se calcularon los indicadores de desempeño energético, se analizaron las emisiones, se aplicó la encuesta tipo Likert, se verificó la correlación mediante Pearson y se evaluaron el escenario base y el escenario optimizado con MEASUR Tool.

Después se desarrolló la fase cualitativa como complemento para interpretar los resultados cuantitativos mediante observación técnica focalizada. Esta parte permitió revisar las desviaciones encontradas en consumo específico, eficiencia térmica, emisiones de SO₂, retorno de condensado, pérdidas térmicas y mantenimiento junto con las condiciones que podían observarse durante la operación del sistema de generación de vapor. De esta manera, el componente cualitativo sirvió para comprender mejor los resultados obtenidos previamente en la fase cuantitativa.

Durante la fase cuantitativa no se realizaron cambios sobre las variables ni pruebas directamente en la caldera. El equipo se analizó tal como venía trabajando en la operación normal de la refinería, sin intervenir su funcionamiento, cambiar el combustible o modificar las condiciones industriales existentes. El estudio además tuvo un alcance descriptivo-correlacional. La parte descriptiva permitió revisar cómo se comportó la caldera desde los aspectos operativo, energético, ambiental y económico. La parte correlacional se utilizó para revisar la asociación entre el sistema de generación de vapor y la eficiencia energética, sin afirmar que una variable fuera la causa directa de la otra.

La Figura 15 resume el diseño metodológico utilizado en la investigación. En ella se observa la secuencia seguida durante el estudio, donde la fase cuantitativa permitió obtener los principales resultados del diagnóstico energético y posteriormente la fase cualitativa ayudó a interpretarlos desde el punto de vista técnico. Con esta secuencia se sustentó finalmente el plan de optimización energética planteado para la caldera 3.

Figura 15. *Diseño metodológico de la investigación.*



Nota. Elaborado por la autora.

2.3. Proceso metodológico

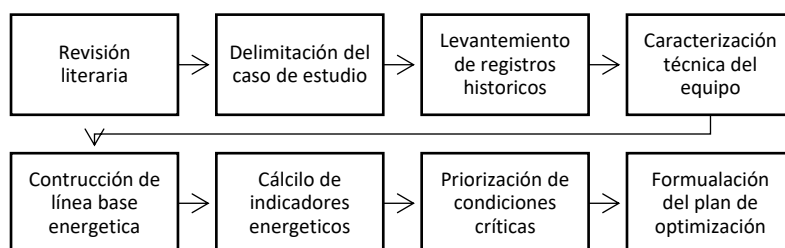
Para desarrollar el estudio se aplicó un diagnóstico energético directamente sobre la caldera 3. Este procedimiento permite revisar cómo se utiliza la energía durante su funcionamiento y observar el comportamiento de las variables que intervienen en la operación. También ayuda a identificar las desviaciones que se presentan y, a partir de los resultados obtenidos, establecer qué aspectos necesitan ser mejorados. El diagnóstico considera revisión documental, caracterización técnica, observación directa, cálculo de indicadores y priorización de las condiciones que muestran mayor importancia.

La mayor parte de la información utilizada en el diagnóstico se obtiene de los registros existentes de operación de la caldera. Entre los datos revisados se encuentran el consumo de fuel oil, producción de vapor, presión, temperatura, agua de alimentación, horas de operación, emisiones, costos y mantenimiento. Al organizar esta información se puede tener una referencia del comportamiento de la caldera, obtener sus indicadores y

revisar cómo se relacionan las condiciones de operación con el rendimiento energético del equipo.

La Figura 16 presenta las etapas utilizadas para desarrollar el diagnóstico energético. Primero se establece la unidad técnica que será estudiada y luego se reúnen los registros históricos junto con las variables de operación. Con estos datos se elabora la línea base, se calculan los indicadores EnPIs y después se organizan las oportunidades identificadas, que sirven como base para formular el plan de optimización.

Figura 16. Ruta del diagnóstico energético de la caldera 3.



Nota. Elaborado por la autora.

La Tabla 14 muestra una secuencia metodológica orientada al diagnóstico energético de la caldera 3. La revisión documental y técnica se desarrolla antes del cálculo de indicadores, de manera que los resultados respondan a datos verificables del equipo y del sistema de generación de vapor.

Tabla 14. Etapas del proceso metodológico.

Etapa	Descripción
1. Revisión literaria.	Identificar metodologías, variables, indicadores y herramientas aplicables al diagnóstico energético de calderas y sistemas de vapor.
2. Delimitación del caso de estudio.	Definir la caldera 3 como unidad técnica de análisis dentro de la Planta Generación de la Refinería La Libertad.
3. Levantamiento de registros históricos.	Recopilar datos de fuel oil, vapor, presión, temperatura, agua de alimentación, horas, emisiones, costos y mantenimiento.
4. Caracterización técnica del equipo.	Organizar fichas técnicas, condiciones de operación, capacidad, combustible utilizado e instrumentación disponible.
5. Construcción de línea base energética.	Relacionar consumo de fuel oil, producción de vapor y condiciones operativas durante el periodo de análisis.
6. Cálculo de indicadores energéticos.	Determinar consumo específico, vaporización específica, eficiencia térmica, índice SO ₂ /límite, costo específico y retorno de condensado.
7. Priorización de condiciones críticas.	Ordenar condiciones críticas y oportunidades mediante GUT, Pareto y FMEA, según la información técnica disponible.

8. Formulación del plan de optimización.	Proponer acciones de mejora energética con base en los resultados del diagnóstico y la priorización técnica.
--	--

Nota. Elaborado por la autora.

2.4. Población y muestra

Para definir la población se tomaron en cuenta tres tipos de elementos que forman parte del sistema de generación de vapor de la Planta Generación. Por un lado están los equipos térmicos que participan directamente en la producción de vapor. También se considera la documentación disponible, como registros de operación, fichas técnicas, reportes de consumo de combustible, monitoreos ambientales, informes de mantenimiento y costos. A esto se suma el personal que interviene en la operación, supervisión, mantenimiento y control técnico del sistema.

Como el análisis se realiza sobre un equipo previamente definido, no fue necesario seleccionar la muestra de forma aleatoria. La parte técnica quedó representada por la caldera 3, que es el equipo sobre el cual se realiza la evaluación energética. Para la revisión documental se utilizaron los registros disponibles del periodo 2025-2026 y se buscó mantener, cuando fue posible, información continua correspondiente por lo menos a doce meses. La muestra humana estuvo conformada por 10 participantes relacionados con operación, mantenimiento, supervisión y control técnico de la Planta Generación.

La Tabla 15 presenta por separado la muestra técnica, documental y humana. Esta organización facilita el levantamiento de la información según el tipo de dato que se necesita para desarrollar el diagnóstico energético de la caldera 3.

Tabla 15. *Población y muestra de la investigación.*

Tipo de población	Población	Muestra	Cantidad
Técnica.	Sistema de generación de vapor de la Planta Generación.	Caldera 3.	1 equipo.
Documental.	Registros operativos, fichas técnicas, monitoreos, costos y mantenimiento.	Registros históricos disponibles del periodo 2025-2026, priorizando una serie continua mínima de doce meses.	12 meses, según disponibilidad documental.
Humana.	Personal vinculado con operación, mantenimiento, supervisión y control técnico.	Participantes seleccionados por relación directa con el sistema.	10 participantes.

Nota. Elaborado por la autora.

2.5. Método e instrumento de recolección de datos

La recolección de la información se trabaja mediante el método analítico y el método documental. El método analítico permite revisar por separado las variables que forman parte del sistema de generación de vapor y que intervienen en su operación y desempeño. Por su parte, el método documental se utiliza para revisar registros históricos, fichas técnicas, reportes internos, monitoreos ambientales, costos y mantenimiento. A esto se suman la observación directa y la encuesta estructurada para completar la información obtenida en campo.

Las técnicas e instrumentos se definieron de acuerdo con lo que se necesita dentro del diagnóstico energético. Mediante la revisión documental se obtiene información histórica y técnica; la ficha técnica permite reunir las características principales de la caldera 3; la observación directa sirve para registrar las condiciones visibles del sistema; la encuesta recoge la información aportada por el personal; y la hoja de cálculo se utiliza para organizar y procesar los datos recopilados.

La Tabla 16 reúne los instrumentos utilizados durante el levantamiento de información. En esta etapa se consideran la revisión documental, las fichas técnicas, la observación directa, la encuesta y la hoja de cálculo como parte de una misma secuencia de trabajo para revisar la caldera 3 a partir de sus datos técnicos y operativos.

Tabla 16. *Técnicas e instrumentos de recolección de datos.*

Técnica	Instrumento	Datos o información obtenida	Aplicación en el estudio
Revisión documental.	Matriz de registros históricos.	Fuel oil, vapor producido, presión, temperatura, agua de alimentación, horas de operación, emisiones, costos y mantenimiento.	Construcción de la línea base energética y cálculo de indicadores.
Caracterización técnica.	Ficha técnica de la caldera 3.	Capacidad, combustible, presión de diseño, temperatura, instrumentación y límites técnicos.	Descripción técnica del equipo seleccionado.
Observación directa.	Ficha de observación técnica.	Condiciones visibles de operación, fugas, purgas, aislamiento, estado de líneas, instrumentación y novedades operativas.	Reconocimiento de condiciones de campo vinculadas al sistema de generación de vapor.
Encuesta estructurada.	Cuestionario Likert derivado de la operacionalización de variables.	Criterios sobre registros, consumo, uso del vapor, procedimientos, mantenimiento, pérdidas visibles y oportunidades de mejora.	Levantamiento de información operativa del personal seleccionado.
Procesamiento de datos.	Hoja de cálculo y matrices de análisis.	Línea base, indicadores energéticos, comparación de variables, costos y priorización de condiciones críticas.	Organización y análisis de resultados técnicos.

Nota. Elaborado por la autora.

2.6. Plan de recolección de datos

El plan de recolección de datos establece la secuencia para obtener la información requerida en el diagnóstico energético. Este plan precisa las fuentes de información, su ubicación, los datos a levantar, las técnicas e instrumentos que se utilizan y la forma de análisis.

La Tabla 17 ordena el levantamiento de información desde la fuente documental hasta los resultados derivados del análisis. Esta estructura permite que cada dato recolectado tenga una función dentro del diagnóstico energético.

Tabla 17. *Plan de recolección de datos.*

Elemento del plan	Descripción
Fuentes de información.	Registros históricos relacionados con la operación de la caldera, consumo de fuel oil, producción de vapor, fichas técnicas, monitoreos ambientales, mantenimiento, costos de operación y participación del personal técnico de la Planta Generación.
Ubicación de las fuentes.	Refinería La Libertad, con énfasis en la Planta Generación, archivos técnicos, registros de operación, reportes internos y documentación del área de mantenimiento relacionada con el sistema de generación de vapor.
Datos técnicos requeridos.	Consumo de fuel oil, vapor producido, presión, temperatura, agua de alimentación, horas de funcionamiento, emisiones, costos, mantenimiento, purgas, fugas y estado de la instrumentación.
Técnicas e instrumentos.	Revisión de documentos mediante una matriz de registros históricos, ficha técnica correspondiente a la caldera 3, ficha para observación directa, cuestionario tipo Likert y hoja de cálculo destinada al procesamiento de la información.
Tratamiento de datos.	Revisión y depuración de los documentos, unificación de unidades, organización de los datos por periodo, elaboración de la línea base, cálculo de indicadores, comparación de resultados ambientales y evaluación económica.
Resultados derivados.	Caracterización técnica de la caldera 3, construcción de la línea base energética, obtención de indicadores EnPIs, reconocimiento de condiciones críticas, ordenamiento de oportunidades de mejora y elaboración del plan de optimización.

Nota. Elaborado por la autora.

2.7. Procedimiento para recolección de datos

El procedimiento utilizado para recoger la información se divide en tres partes: recolección de datos, tratamiento de la información y presentación de los resultados. De esta manera, primero se obtiene la información documental y de campo, luego se organiza y analiza, hasta llegar a la evaluación técnica del desempeño energético de la caldera 3.

La Tabla 18 muestra cómo se desarrolla este procedimiento desde la obtención de los datos hasta la presentación final de los resultados. Esta secuencia permite realizar el

diagnóstico energético utilizando información que pueda ser revisada y criterios de análisis relacionados con la forma en que opera la caldera 3.

Tabla 18. *Procedimiento para la recolección de datos.*

Planificación		Actividades
Recolección de datos.	de	1. Visita técnica a la Planta Generación de la Refinería La Libertad. 2. Identificación de la caldera 3 como unidad técnica de análisis. 3. Revisión de registros históricos de operación y consumo energético. 4. Levantamiento de fichas técnicas y reportes internos. 5. Observación directa del sistema de generación de vapor. 6. Aplicación de encuesta al personal seleccionado.
Tratamiento de la información.	de la	1. Organización y clasificación de los datos recolectados. 2. Depuración de registros históricos y verificación de consistencia. 3. Construcción de la base de datos del diagnóstico energético. 4. Cálculo de línea base e indicadores de desempeño. 5. Comparación de variables energéticas, ambientales y económicas. 6. Priorización de condiciones críticas mediante GUT, Pareto y FMEA.
Presentación de resultados.	de	1. Caracterización técnica de la caldera 3. 2. Presentación de la línea base energética. 3. Exposición de indicadores de desempeño energético. 4. Análisis de emisiones, costos y mantenimiento. 5. Determinación de oportunidades de mejora. 6. Formulación del plan de optimización energética.

Nota. Elaborado por la autora.

2.8. Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento de los datos se realizó mediante una hoja de cálculo organizada según el periodo de análisis. En esta matriz se registraron los datos de consumo de fuel oil, vapor producido, presión, temperatura, agua de alimentación, horas de operación, emisiones, costos y mantenimiento. Antes de empezar con los cálculos se revisó que los registros fueran consistentes, que no existieran datos faltantes, que las unidades de medida correspondieran entre sí y que hubiera relación entre el combustible consumido y la cantidad de vapor producido.

Una vez revisados los registros, se comenzó observando cómo variaban los datos durante el periodo estudiado. De ahí se trabajó con la línea base energética y se calcularon los indicadores EnPIs. Las emisiones se revisaron frente a los límites reportados y el consumo de combustible también se analizó desde su costo. Aparte de estos cálculos, se tomó lo encontrado durante la observación directa y en la encuesta, principalmente en lo relacionado con la operación de la caldera, su control, mantenimiento, novedades y mejoras identificadas.

La Tabla 19 presenta de forma resumida cómo se trató la información recolectada. A partir de este procesamiento, los registros de operación y los datos obtenidos en campo

se convierten en resultados técnicos, ambientales y económicos que permiten revisar el desempeño energético de la caldera 3.

Tabla 19. *Procesamiento y análisis de datos.*

Actividad		Descripción	Resultado esperado
Depuración de registros.	de	Revisión de datos faltantes, duplicados, unidades de medida y consistencia de la información.	Base documental validada.
Construcción línea base.	de	Relación histórica entre consumo de fuel oil, producción de vapor, horas de operación y condiciones técnicas.	Comportamiento energético de referencia.
Cálculo de indicadores.	de	Determinación de consumo específico, vaporización específica, eficiencia térmica, índice SO ₂ /límite, costo específico de vapor y retorno de condensado.	Resultados técnicos del diagnóstico energético.
Análisis ambiental.		Comparación de SO ₂ , CO y NO _x con límites reportados.	Identificación de condiciones ambientales relevantes.
Análisis económico		Relación entre costo de fuel oil, producción de vapor y desempeño energético.	Costo específico asociado al vapor generado.
Priorización de condiciones críticas.	de	Aplicación de GUT, Pareto y FMEA según los resultados obtenidos.	Ordenamiento de causas y oportunidades de mejora.
Interpretación operativa.		Revisión de observación directa y encuesta estructurada.	Criterios para la formulación del plan de optimización.

Nota. Elaborado por la autora.

Criterio de trazabilidad y aplicación del balance energético

El diagnóstico se desarrolló mediante un balance energético directo aplicado al límite formado por la entrada de Fuel Oil, la generación de vapor y los flujos auxiliares del sistema de caldera. La eficiencia se obtuvo al comparar la energía química suministrada por el combustible con la energía útil transferida al vapor. Esta forma de evaluación permite comparar la línea base anual con el escenario optimizado sin confundir el desempeño energético con una prueba de aceptación del equipo.

La estructura del balance se alineó con los criterios de ASME PTC 4 para generadores de vapor: delimitación del sistema, identificación de entradas y salidas, uso consistente de unidades y control de las variables que influyen en el resultado. En este estudio, los valores anuales de Fuel Oil, vapor, horas de operación, presión, temperatura y condensado se utilizaron como base de cálculo; las emisiones se emplearon para verificar la condición ambiental y orientar el control de combustión.

Tabla 20. *Trazabilidad de las variables empleadas en el balance y diagnóstico.*

Variable	Fuente de información	Aplicación en la tesis	Control de calidad
Fuel Oil	Registro anual de operación: 813.200 gal/año.	Energía de entrada mediante PCI de 0,1583 GJ/gal.	Conciliación mensual de consumo y certificado de PCI por lote.
Vapor	Registro anual: 45.790 t/año.	Energía útil mediante diferencial entálpico de 2,36 GJ/t.	Contraste con horas de operación y producción mensual.
Presión y temperatura	Registros de caldera: 150 psig y 365,99 °F en MEASUR.	Condición del vapor para el modelo y el balance exergético.	Verificación mensual de manómetros y termómetros.
Emisiones	Informes mensuales de monitoreo de fuentes fijas.	Comparación de CO, NOx y SO2 con valores de norma.	Verificación del desempeño de analizadores con gases patrón antes del monitoreo.
Azufre del Fuel Oil	Acta de acciones correctivas de diciembre de 2025.	Relación entre calidad de combustible y comportamiento del SO2.	Aceptación del combustible con certificado de azufre por lote.

Nota. Elaborado por la autora con base en los registros de operación, los informes mensuales de emisiones y el acta de acciones correctivas.

La información ambiental cuenta con una verificación propia del analizador antes de cada monitoreo, mientras que las variables de operación se controlan mediante la matriz mensual de la caldera. De esta manera, la incertidumbre de las concentraciones de gases se interpreta según el método de laboratorio y la consistencia del balance se revisa mediante la correspondencia entre combustible, vapor, horas de operación y condiciones de proceso.

2.9. Línea base energética

Para conocer cómo ha venido trabajando la caldera 3 se establece una línea base energética tomando como referencia su información de operación de un periodo determinado. En este caso se trabajó con los registros disponibles de 2025-2026 y se buscó contar, siempre que la documentación lo permitiera, con al menos doce meses continuos de información. Para formar esta referencia se tomaron los datos de fuel oil consumido, vapor producido, presión, temperatura, agua de alimentación, horas de operación, emisiones, costos y mantenimiento. Con esta información se pueden comparar distintos periodos, identificar cambios en el comportamiento y revisar el desempeño energético que presenta el equipo.

La Tabla 20 reúne los datos que se necesitan como mínimo para elaborar la línea base energética. Estos registros sirven como referencia para comparar el comportamiento de la caldera 3 y posteriormente realizar el cálculo de los indicadores de desempeño.

Tabla 21. Datos requeridos para la línea base energética.

Dato requerido	Descripción	Uso en la línea base
Consumo de fuel oil.	Volumen o masa consumida por periodo.	Variable energética de entrada.
Producción de vapor.	Toneladas o flujo de vapor generado.	Variable de salida útil.
Horas de operación.	Tiempo real de funcionamiento de la caldera.	Normalización del consumo.
Presión y temperatura.	Condiciones operativas del vapor y del sistema.	Control del comportamiento térmico.
Agua alimentación.	Volumen, temperatura y condiciones de ingreso al sistema.	Evaluación del requerimiento térmico.
Emisiones.	SO ₂ , CO, NO _x y límites reportados.	Relación energético-ambiental.
Costos.	Costo del combustible y costos asociados al proceso.	Evaluación económica del desempeño.
Mantenimiento.	Intervenciones, fallas, purgas, fugas, limpieza e instrumentación.	Interpretación de variaciones operativas.

Nota. Elaborado por la autora.

2.10. Indicadores de desempeño energético

Los indicadores de desempeño energético permiten trabajar los registros de operación como valores que pueden ser medidos y comparados. Para evaluar la caldera 3 se toman en cuenta indicadores energéticos, ambientales y económicos, ya que el análisis considera el combustible consumido, el vapor producido, el comportamiento de las emisiones y los costos que se generan durante el proceso.

En la Tabla 21 se agrupan los indicadores que se utilizarán para analizar el comportamiento energético de la caldera 3. Para calcularlos primero deben estar ordenados los registros técnicos, ya que de ellos se obtienen las relaciones entre el fuel oil consumido, el vapor generado, las condiciones en que trabaja el equipo, las emisiones y los costos asociados.

Tabla 22. Indicadores de desempeño energético de la caldera 3.

Indicador	Fórmula general	Interpretación
Consumo específico.	$\frac{\text{Fuel oil consumido}}{\text{vapor producido}}$	Menor valor indica mejor aprovechamiento del combustible.
Vaporización específica.	$\frac{\text{Vapor producido}}{\text{fuel oil consumido}}$	Mayor valor indica mejor generación por unidad de combustible.
Eficiencia térmica.	$\frac{\text{Energía útil del vapor}}{\text{energía del combustible}} \times 100$	Mide el rendimiento energético de la caldera.
Índice SO₂/límite.	$\frac{\text{SO}_2 \text{ medido}}{\text{límite permisible}}$	Valor mayor a 1 indica desviación respecto al límite.

Costo específico de vapor.	$\frac{\text{Costo de fuel oil}}{\text{vapor producido}}$	Evalúa el impacto económico del consumo.
Retorno de condensado.	$\frac{\text{Condensado retornado}}{\text{vapor generado} \times 100}$	Mayor retorno reduce el requerimiento térmico del agua de alimentación.

Nota. Elaborado por la autora.

2.11. Validación del instrumento de encuesta

La encuesta se aplicó mediante escala Likert de cinco niveles, de acuerdo con las preguntas definidas a partir de la operacionalización de variables. La validez del instrumento se establece mediante juicio de expertos, considerando claridad, pertinencia y coherencia de los ítems con las variables, dimensiones e indicadores establecidos.

La confiabilidad mediante alfa de Cronbach se aplicó únicamente si el número de respuestas válidas constituyen una estimación aceptable. En caso contrario, el cuestionario se utiliza como técnica complementaria de percepción operativa, sin reemplazar los registros históricos, los indicadores energéticos ni el análisis técnico de la caldera 3.

2.12. Procedimiento metodológico según objetivos

El procedimiento metodológico se organiza de acuerdo con los objetivos específicos de la investigación. Esta relación permite verificar que cada objetivo tenga procesos, herramientas y fuentes de información asociadas al diagnóstico energético de la caldera 3.

La Tabla 22 muestra la correspondencia entre objetivos, procesos, herramientas y fuentes de información. Esta relación mantiene el desarrollo metodológico centrado en la caldera 3 y en los resultados requeridos para formular el plan de optimización energética.

Tabla 23. *Proceso metodológico según objetivos.*

Objetivo específico	Proceso	Herramienta	Fuente de información
OE1. Realizar una revisión sistemática de la literatura sobre eficiencia energética en sistemas de generación de vapor industrial, mediante el análisis de estudios científicos especializados, para la delimitación de variables, indicadores y enfoques metodológicos aplicables al caso de estudio.	Búsqueda en Scopus, aplicación de criterios de inclusión y exclusión, análisis bibliométrico, matriz de artículos, estado del arte y discusión del estado del arte.	Scopus, Bibliometrix/ Biblioshiny y matriz documental.	Artículos científicos 2021-2026.

OE2. Diseñar el marco metodológico del estudio del sistema de generación de vapor de la Planta Generación de la Refinería La Libertad, mediante la selección de métodos, técnicas, instrumentos y criterios de análisis, para la estructuración del proceso investigativo.	Definición de enfoque, diseño, metodología, población, muestra, variables, operacionalización, técnicas, instrumentos, plan de recolección, procesamiento, línea base e indicadores.	Diagnóstico energético, matriz documental, ficha técnica, ficha de observación, encuesta estructurada, hoja de cálculo e indicadores EnPIs.	Registros históricos, fichas técnicas de C3, reportes internos, observación directa y personal técnico.
OE3. Proponer un plan de optimización energética para la caldera 3 del sistema de generación de vapor de la Planta Generación de la Refinería La Libertad, con base en los resultados del diagnóstico energético, para el mejoramiento de su desempeño operativo, energético y ambiental.	Cálculo de indicadores, construcción de línea base, análisis energético-ambiental, análisis económico, priorización de condiciones críticas y formulación de acciones de mejora.	EnPIs, línea base energética, GUT, Pareto, FMEA y análisis económico.	Registros de consumo, vapor, emisiones, costos, mantenimiento y observación técnica.

Nota. Elaborado por la autora.

2.13. Variable de estudio

Las variables consideradas en el estudio parten del título, la formulación del problema y los objetivos definidos para la investigación. Como variable independiente se tiene al sistema de generación de vapor, que para este trabajo se encuentra delimitado a la caldera 3 de la Planta Generación de la Refinería La Libertad. Esta variable comprende los procesos, condiciones de operación, registros, controles y actividades de mantenimiento que intervienen en la producción de vapor.

La variable dependiente corresponde a la eficiencia energética, relacionada con la cantidad de energía útil obtenida mediante el vapor frente a la energía que ingresa al sistema a través del combustible. Con esta variable se puede revisar el desempeño energético de la caldera considerando tanto el aprovechamiento del combustible como las pérdidas de energía que se presentan durante el proceso.

La relación entre las dos variables permite revisar de qué manera el sistema de generación de vapor se encuentra asociado con la eficiencia energética de la caldera 3. Para realizar este análisis se utilizaron la revisión documental, observación directa, cálculo de indicadores técnicos y una encuesta estructurada utilizada como apoyo complementario.

2.14. Operacionalización de las variables

La operacionalización permite llevar las variables planteadas a dimensiones e indicadores que puedan ser evaluados durante el estudio. Para la variable independiente sistema de generación de vapor se consideran dimensiones relacionadas con los registros de operación, utilización del vapor, control del consumo de combustible y procedimientos utilizados durante la operación y el mantenimiento.

Para la variable dependiente eficiencia energética se toman en cuenta dimensiones relacionadas con el control de pérdidas, el comportamiento energético del equipo y la identificación de oportunidades de mejora. A partir de estas dimensiones se puede revisar cómo se aprovecha el combustible y cuál es el desempeño que presenta el proceso.

La Tabla 23 muestra la operacionalización de las variables junto con sus dimensiones, indicadores, técnicas e instrumentos. Las preguntas se aplicaron utilizando una escala Likert de cinco niveles y los resultados obtenidos se comparan con los registros históricos, la línea base energética y los indicadores técnicos utilizados en el diagnóstico.

Tabla 24. Operacionalización de variables de estudio.

Variabl e Indepen diente	Definición conceptual	Definición operaciona l	Dimensiones	Indicadores	Preguntas	Escala de medició n
Sistema de generaci ón de vapor.	Conjunto de equipos, redes, accesorios, instrumento s y condiciones operativas que permiten transformar la energía del combustibl e en vapor útil para los procesos industriales .	Se analiza mediante las condiciones de operación de las calderas, el sistema de combustión , el agua de alimentació n, el retorno de condensado , la distribución de vapor, la instrumenta ción y el mantenimie nto operativo.	Dimensión 1. Registro operativo del sistema: comprende la disponibilidad de información sobre consumo, operación y funcionamiento de las calderas.	Indicador 1. Registro de consumo de combustible.	➤ ¿Se registran de forma ordenada los consumos de combustible utilizados en las calderas?	Ordinal (Likert 1-5).
				Indicador 2. Registro por equipo generador de vapor.	➤ ¿Permiten los registros disponibles conocer el consumo de combustible por cada caldera?	
			Dimensión 2. Demanda y uso del vapor: se refiere a la identificación de los procesos que utilizan vapor y su comportamiento operativo.	Indicador 3. Identificación de áreas de mayor demanda de vapor.	➤ ¿Se identifican claramente las áreas o procesos que requieren mayor demanda de vapor?	
				Indicador 4. Conocimiento operativo del uso de vapor.	➤ ¿Conoce cuáles son los principales usos del vapor dentro de la planta?	
			Dimensión 3. Control del consumo operativo: comprende el seguimiento de las variaciones de combustible frente a la demanda de vapor.	Indicador 5. Análisis de variaciones de consumo.	➤ ¿Se analizan las variaciones de consumo de combustible cuando cambia la demanda de vapor?	
				Indicador 6. Detección de consumos anormales.	➤ ¿Se revisan los registros operativos para detectar consumos anormales de combustible?	
			Dimensión 4. Procedimientos de operación: corresponde a la existencia y aplicación de instrucciones operativas para el sistema de generación de vapor.	Indicador 7. Existencia de procedimientos operativos.	➤ ¿Existen procedimientos claros para operar el sistema de generación de vapor?	
				Indicador 8. Aplicación de procedimientos para evitar desperdicios.	➤ ¿Los procedimientos de operación ayudan a evitar desperdicios de vapor o combustible?	
			Dimensión 5. Comunicación y reporte operativo: se refiere al registro y atención de novedades relacionadas con el funcionamiento del sistema.	Indicador 9. Registro de novedades operativas.	➤ ¿Las novedades relacionadas con presión, vapor, combustible o fallas se registran durante la operación?	
				Indicador 10. Uso de reportes para mejora operativa.	➤ ¿Las novedades reportadas por los operadores son tomadas en cuenta para mejorar la operación del sistema?	

Variable Dependiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Preguntas	Técnica e instrumento
Eficiencia energética.	Relación entre la energía útil obtenida y la energía suministrada al sistema, considerando el uso eficiente del combustible y la reducción de pérdidas energéticas.	Se evalúa mediante el desempeño térmico, consumo de combustible, pérdidas energéticas, calidad de combustión e indicadores de desempeño energético asociados al sistema de generación de vapor.	Dimensión 1. Identificación de oportunidades de mejora: comprende el reconocimiento y priorización de acciones que puedan mejorar el desempeño energético.	Indicador 1. Identificación de oportunidades energéticas.	➤ ¿La empresa identifica oportunidades de mejora relacionadas con el uso de vapor y combustible?	Ordinal (Likert 1-5).
				Indicador 2. Priorización de oportunidades de mejora.	➤ ¿Las oportunidades de mejora energética se priorizan según su importancia para la operación?	
			Dimensión 2. Evaluación económica y operativa: se refiere a la consideración de costos y viabilidad de las acciones de mejora energética.	Indicador 3. Consideración de costos de combustible.	➤ ¿Se consideran los costos de combustible al momento de analizar mejoras en el sistema de generación de vapor?	
				Indicador 4. Viabilidad de mejoras energéticas.	➤ ¿Se evalúa si las mejoras propuestas son viables para aplicarse en la operación del sistema?	
			Dimensión 3. Control de pérdidas energéticas: comprende la reducción de pérdidas asociadas a mantenimiento, fugas, calor y fallas visibles.	Indicador 5. Mantenimiento para reducción de pérdidas.	➤ ¿El mantenimiento de calderas, líneas de vapor y equipos relacionados ayuda a reducir pérdidas de energía?	
				Indicador 6. Reporte de fugas y pérdidas visibles.	➤ ¿Las fugas de vapor, pérdidas de calor o fallas visibles son reportadas cuando se presentan?	
			Dimensión 4. Monitoreo del desempeño energético: se refiere al uso de instrumentos y seguimiento de resultados para controlar el comportamiento energético del sistema.	Indicador 7. Control mediante instrumentos de medición.	➤ ¿Los instrumentos de medición disponibles permiten controlar adecuadamente la operación del sistema?	
				Indicador 8. Seguimiento de mejoras o correcciones.	➤ ¿Se realiza seguimiento a los resultados obtenidos después de aplicar mejoras o correcciones operativas?	
			Dimensión 5. Plan de optimización energética: comprende la participación del personal y la utilidad de un plan para mejorar el uso del vapor y combustible.	Indicador 9. Aporte del personal operativo.	➤ ¿El personal operativo puede aportar información útil para identificar problemas de eficiencia energética?	
				Indicador 10. Utilidad del plan de optimización energética.	➤ ¿Un plan de optimización energética ayudaría a mejorar el uso del combustible y del vapor en la Planta Generación?	

Nota. Elaborado por la autora

CAPÍTULO III

MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Marco de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante el diagnóstico energético realizado a la caldera 3 de la Planta Generación de la Refinería La Libertad, ubicada en el cantón La Libertad, provincia de Santa Elena, Ecuador. Para desarrollar el análisis se sigue la metodología establecida en el capítulo II, donde se consideran la revisión documental, observación directa, encuesta estructurada, registros de emisiones, línea base energética, indicadores de desempeño y priorización de oportunidades de optimización.

Los registros utilizados corresponden al periodo que va desde junio de 2025 hasta mayo de 2026. Con estos meses se completó un año de información para realizar el análisis. Los datos se fueron ordenando de manera mensual e incluyeron consumo de fuel oil, producción de vapor, presión, temperatura, horas de operación, retorno de condensado, emisiones y costos.

Para presentar los resultados se decidió separarlos en tres partes. En la primera se revisan los instrumentos que se utilizaron y los resultados de su confiabilidad y validez. Después se presenta información de la empresa, el caso que se está estudiando y las principales condiciones de operación del sistema de generación de vapor. La última parte corresponde directamente al diagnóstico de la caldera 3, donde se muestran la línea base, los indicadores, las condiciones que resultaron críticas y la propuesta de optimización energética.

Confiabilidad y validez de los instrumentos de investigación

La confiabilidad y validez de los instrumentos permite revisar si la información obtenida resulta adecuada para estudiar la relación entre el sistema de generación de vapor y la eficiencia energética de la caldera 3. Para trabajar esta parte se contó con los registros históricos y la ficha técnica del equipo, además de una ficha para la observación directa y el cuestionario Likert. También se utilizó la matriz de validación por expertos y una hoja de cálculo donde se procesaron los indicadores.

Los primeros datos se tomaron de los informes mensuales de emisiones y de la documentación que estaba disponible sobre operación, consumo de fuel oil, producción

de vapor, costos y mantenimiento. Otra parte se obtuvo revisando directamente el sistema, principalmente las líneas de vapor, purgas, aislamiento, fugas, instrumentación y su condición operativa. Con la encuesta se recogió además el criterio del personal técnico sobre los registros, el control de la operación, mantenimiento, pérdidas visibles y posibles mejoras.

3.1.1.1. Muestreo no probabilístico

Para el estudio se utilizó un muestreo no probabilístico e intencional porque la investigación está dirigida específicamente a la caldera 3 de la Planta Generación de la Refinería La Libertad. La selección se realizó tomando información, equipos, registros y participantes que mantienen una relación directa con el problema que se está analizando.

La muestra técnica está representada por la caldera 3, debido a que es el equipo seleccionado para evaluar la eficiencia energética. En la muestra documental se consideran informes de monitoreo de emisiones, registros operativos, datos de consumo, reportes de mantenimiento y costos relacionados con el sistema de generación de vapor. La muestra humana está conformada por 10 participantes vinculados con operación, mantenimiento, supervisión, ambiente y control técnico.

La Tabla 24 presenta que la selección de la muestra se realizó considerando criterios técnicos y no mediante una selección aleatoria. Esto responde al carácter aplicado de la investigación, ya que para desarrollar el estudio se necesita trabajar directamente con información correspondiente a la caldera 3 y al sistema de generación de vapor.

Tabla 25. *Muestreo no probabilístico aplicado al estudio.*

Tipo de muestra	Criterio de selección	Elemento seleccionado	Justificación
Técnica.	Relación directa con el problema de eficiencia energética.	Caldera 3 de la Planta Generación.	Equipo delimitado como unidad técnica de análisis.
Documental.	Disponibilidad y relación con consumo, emisiones, operación y mantenimiento.	Informes de emisiones, registros de fuel oil, vapor, costos y mantenimiento.	Permiten construir línea base e indicadores energéticos.
Humana.	Personal con conocimiento directo del sistema de vapor.	10 participantes de operación, mantenimiento, ambiente y supervisión.	Complementa el diagnóstico con criterios operativos.

Nota. Elaborado por la autora.

3.1.1.2. Plan de recolección de datos

El plan de recolección de datos se estructuró con el propósito de obtener información suficiente para caracterizar la caldera 3, construir una línea base energética, calcular indicadores de desempeño, evaluar emisiones y formular una propuesta de optimización. La recolección se organizó mediante revisión documental, observación directa, aplicación de encuesta y procesamiento de datos.

La Tabla 25 presenta la relación entre las fuentes de información y los instrumentos empleados. Esta planificación permite organizar los resultados del estudio y vincular cada dato recolectado con su función dentro del diagnóstico energético.

Tabla 26. *Plan de recolección de datos.*

Fuente de información	Técnica aplicada	Instrumento utilizado	Resultado esperado
Informes mensuales de emisiones.	Revisión documental.	Matriz ambiental.	Valores de CO, NO _x y SO ₂ de la caldera 3.
Registros de fuel oil y vapor.	Revisión documental.	Matriz de consumo energético.	Línea base energética y consumo específico.
Fichas técnicas de equipos.	Caracterización técnica.	Ficha técnica.	Datos de operación, capacidad y combustible.
Sistema de vapor.	Observación directa.	Ficha de observación.	Identificación de fugas, purgas, aislamiento y puntos críticos.
Personal técnico.	Encuesta estructurada.	Cuestionario Likert.	Criterios sobre operación, control, mantenimiento y oportunidades.
Resultados del diagnóstico.	Procesamiento cuantitativo.	Hoja de cálculo y SPSS.	Indicadores, confiabilidad, correlación y priorización.

Nota. Elaborado por la autora.

3.1.1.3. Elaboración del cuestionario Likert

El cuestionario Likert se elaboró a partir de la operacionalización de variables establecida en el capítulo II. La variable independiente corresponde al sistema de generación de vapor, mientras que la variable dependiente corresponde a la eficiencia energética. El instrumento se estructuró con 20 preguntas, distribuidas en 10 ítems para la variable independiente y 10 ítems para la variable dependiente.

La escala de valoración utilizada fue de cinco niveles: 1 = nunca, 2 = rara vez, 3 = algunas veces, 4 = casi siempre y 5 = siempre. Esta escala permitió transformar la percepción operativa del personal en valores numéricos procesables mediante estadística descriptiva y análisis de correlación.

La Tabla 26 muestra la escala empleada para la medición de las respuestas. Esta escala permitió evaluar el nivel de percepción del personal sobre registros operativos,

control del consumo, procedimientos, mantenimiento, pérdidas, indicadores y oportunidades de optimización energética.

Tabla 27. *Escala Likert aplicada en el cuestionario.*

Valor	Categoría	Interpretación
1	Nunca.	La condición no se realiza o no existe evidencia de aplicación.
2	Rara vez.	La condición se realiza de forma ocasional o limitada.
3	Algunas veces.	La condición se realiza de manera parcial o irregular.
4	Casi siempre.	La condición se realiza con frecuencia.
5	Siempre.	La condición se realiza de forma constante y controlada.

Nota. Elaborado por la autora.

La Tabla 27 organiza las preguntas de acuerdo con las variables y dimensiones del estudio. Esta asignación permite que el cuestionario mantenga relación directa con la operacionalización y con el objetivo de evaluar el sistema de generación de vapor y la eficiencia energética.

Tabla 28. *Asignación de preguntas por variable y dimensión.*

Preguntas	Variable	Dimensión evaluada
P1-P2	Sistema de generación de vapor.	Registro operativo del sistema.
P3-P4	Sistema de generación de vapor.	Demanda y uso del vapor.
P5-P6	Sistema de generación de vapor.	Control del consumo operativo.
P7-P8	Sistema de generación de vapor.	Procedimientos de operación y mantenimiento.
P9-P10	Sistema de generación de vapor.	Comunicación y reporte operativo.
P11-P12	Eficiencia energética.	Identificación de oportunidades de mejora.
P13-P14	Eficiencia energética.	Evaluación económica y operativa.
P15-P16	Eficiencia energética.	Control de pérdidas energéticas.
P17-P18	Eficiencia energética.	Monitoreo del desempeño energético.
P19-P20	Eficiencia energética.	Plan de optimización energética.

Nota. Elaborado por la autora.

3.1.1.4. Validación por expertos

La validación del cuestionario se realizó mediante juicio de expertos. Para ello, se consideraron cuatro evaluadores con conocimientos en eficiencia energética, operación de sistemas térmicos, mantenimiento industrial y metodología de investigación. Cada experto revisó el instrumento en función de claridad, pertinencia, coherencia, suficiencia y aplicabilidad.

La Tabla 28 evidencia que el instrumento fue considerado aplicable para la recolección de información. Las observaciones de los expertos permitieron mejorar la redacción de los ítems y ajustar el cuestionario al contexto técnico de la caldera 3.

Tabla 29. *Modelo de validación del instrumento por expertos.*

Experto	Perfil técnico	Resultado de validación	Observación general
Experto 1.	Ingeniería industrial / energía.	Aprobado.	El instrumento presenta coherencia con las variables.
Experto 2.	Operación de sistemas térmicos.	Aprobado.	Las preguntas son pertinentes para operación de calderas.
Experto 3.	Mantenimiento industrial.	Aprobado.	El cuestionario permite identificar condiciones operativas.
Experto 4.	Metodología de investigación.	Aprobado.	La escala y estructura son adecuadas para el estudio.

Nota. Elaborado por la autora.

3.1.1.5. Análisis de validación del instrumento

El análisis de validación se realizó mediante una matriz de valoración porcentual. Cada experto calificó los aspectos del instrumento en una escala de 0 a 100. El promedio general permitió determinar si el cuestionario era válido para su aplicación al personal seleccionado.

La Tabla 29 presenta un promedio general de validación de 96,68 %, valor que indica una aceptación alta del instrumento. Por tanto, el cuestionario se considera válido para complementar el diagnóstico energético de la caldera 3.

Tabla 30. *Análisis de validación del instrumento por expertos.*

Aspecto evaluado	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Experto 4	Promedio
Claridad.	96	95	97	96	96,00
Pertinencia.	98	96	97	98	97,25
Coherencia.	97	96	98	97	97,00
Suficiencia.	95	94	96	95	95,00
Aplicabilidad.	98	97	98	97	97,50
Redacción técnica.	96	95	96	96	95,75
Relación con variables.	98	97	98	98	97,75
Relación con dimensiones.	97	96	97	97	96,75
Escala de medición.	96	95	97	96	96,00
Utilidad para el diagnóstico.	98	97	98	98	97,75
Promedio general.	96,90	95,80	97,20	96,80	96,68

Nota. Elaborado por la autora.

3.1.1.6. Fiabilidad de la información recolectada

La fiabilidad del cuestionario se evaluó mediante el coeficiente alfa de Cronbach, con el fin de determinar la consistencia interna de los ítems aplicados. La encuesta fue estructurada con 20 preguntas y aplicada a 10 participantes relacionados con la operación, mantenimiento, supervisión y control técnico del sistema de generación de vapor.

Tabla 31. *Escala de interpretación del alfa de Cronbach.*

Coefficiente alfa	Interpretación
$\alpha \geq 0,90$	Excelente.
$0,80 \leq \alpha < 0,90$	Buena.
$0,70 \leq \alpha < 0,80$	Aceptable.
$0,60 \leq \alpha < 0,70$	Cuestionable.
$0,50 \leq \alpha < 0,60$	Baja.
$\alpha < 0,50$	Inaceptable.

Nota. Elaborado por la autora.

La Tabla 31 muestra un alfa de Cronbach de 0,846, lo cual representa una confiabilidad buena. Este resultado utiliza los datos de la encuesta como información complementaria del diagnóstico energético, sin sustituir los registros históricos, los indicadores calculados ni los informes técnicos de emisiones.

Tabla 32. *Resultado de fiabilidad del cuestionario.*

Estadístico	Resultado
Alfa de Cronbach.	0,846
Alfa de Cronbach basado en elementos estandarizados.	0,854
Número de ítems.	20
Número de participantes.	10
Interpretación.	Buena confiabilidad

Nota. Elaborado por la autora.

Resultados del análisis estadístico con SPSS

Los resultados de la encuesta fueron tabulados y procesados mediante estadística descriptiva. Para cada pregunta se calculó el promedio, la desviación estándar y la interpretación general de la respuesta. El análisis permitió reconocer debilidades en el registro operativo, control de consumo, uso de indicadores y seguimiento energético.

La Tabla 32 muestra que las preguntas relacionadas con registro operativo, indicadores y control de pérdidas presentan medias bajas o moderadas. En contraste, las preguntas P19 y P20 muestran alta aceptación del personal hacia la elaboración de un plan de optimización energética. Este resultado evidencia que el personal reconoce la utilidad de mejorar el seguimiento del sistema, aunque los mecanismos actuales de control energético no se encuentran plenamente estructurados.

Tabla 33. *Resultados descriptivos del cuestionario Likert.*

Pregunta	Variable	Media	Desv. estándar	Interpretación
P1	Sistema de generación de vapor.	2,10	0,88	Registro de consumo limitado.
P2	Sistema de generación de vapor.	2,00	0,82	Registro por caldera poco estructurado.

P3	Sistema de generación de vapor.	2,50	0,85	Identificación parcial de demanda de vapor.
P4	Sistema de generación de vapor.	2,60	0,84	Conocimiento operativo moderado.
P5	Sistema de generación de vapor.	2,20	0,79	Análisis irregular de variaciones de consumo.
P6	Sistema de generación de vapor.	2,30	0,95	Detección limitada de consumos anormales.
P7	Sistema de generación de vapor.	2,40	0,97	Procedimientos parcialmente aplicados.
P8	Sistema de generación de vapor.	2,50	0,85	Control parcial de desperdicios.
P9	Sistema de generación de vapor.	2,80	0,92	Registro operativo con aplicación irregular.
P10	Sistema de generación de vapor.	2,60	0,84	Uso limitado de reportes para mejora.
P11	Eficiencia energética.	2,30	0,82	Identificación parcial de oportunidades.
P12	Eficiencia energética.	2,20	0,79	Priorización poco estructurada.
P13	Eficiencia energética.	2,10	0,74	Bajo uso de indicadores energéticos.
P14	Eficiencia energética.	2,40	0,84	Evaluación económica parcial.
P15	Eficiencia energética.	2,50	0,85	Control de pérdidas no sistemático.
P16	Eficiencia energética.	2,30	0,82	Reporte de fugas y pérdidas irregular.
P17	Eficiencia energética.	2,70	0,95	Monitoreo operativo moderado.
P18	Eficiencia energética.	2,60	0,84	Seguimiento de mejoras limitado.
P19	Eficiencia energética.	4,50	0,53	Alta percepción sobre aporte del personal.
P20	Eficiencia energética	4,70	0,48	Alta aceptación del plan de optimización.

Nota. Elaborado por la autora.

La Tabla 33 resume los resultados por variable. La variable sistema de generación de vapor presenta una media de 2,40, lo que evidencia debilidades en registros, control de consumo y procedimientos. La variable eficiencia energética presenta una media de 2,83, influenciada por la alta aceptación del plan de optimización, aunque los indicadores y el control de pérdidas muestran valores bajos.

Tabla 34. *Resumen por variable de estudio.*

Variable	Número de ítems	Media general	Interpretación
Sistema de generación de vapor.	10	2,40	Gestión operativa parcialmente estructurada.
Eficiencia energética.	10	2,83	Desempeño energético con oportunidades de mejora.
Promedio global.	20	2,62	Nivel medio-bajo de control energético percibido.

Nota. Elaborado por la autora.

Verificación de hipótesis

La verificación de hipótesis se realizó con el propósito de determinar si existe relación estadística entre la variable independiente sistema de generación de vapor y la

variable dependiente eficiencia energética. Para ello, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, aplicado a los promedios obtenidos en la encuesta estructurada.

Hipótesis nula (H_0): no existe relación significativa entre el sistema de generación de vapor y la eficiencia energética de la caldera 3 de la Planta Generación de la Refinería La Libertad.

Hipótesis alternativa (H_1): existe relación significativa entre el sistema de generación de vapor y la eficiencia energética de la caldera 3 de la Planta Generación de la Refinería La Libertad.

Tabla 35. *Escala de interpretación del coeficiente de Pearson.*

Valor de r	Interpretación
$r = 1$	Correlación positiva perfecta.
$0,80 < r < 1$	Correlación positiva muy fuerte.
$0,60 < r \leq 0,80$	Correlación positiva fuerte.
$0,40 < r \leq 0,60$	Correlación positiva moderada.
$0,20 < r \leq 0,40$	Correlación positiva baja.
$0 < r \leq 0,20$	Correlación positiva muy baja.
$r = 0$	Correlación nula.
$r < 0$	Correlación negativa.

Nota. Elaborado por la autora.

La Tabla 35 presenta un coeficiente de Pearson de 0,812 y una significancia bilateral de 0,004. Como la significancia obtenida se encuentra por debajo de 0,05, la hipótesis nula no se mantiene y se considera la hipótesis alternativa planteada. A partir de este resultado se establece que existe una relación positiva muy fuerte entre el sistema de generación de vapor y la eficiencia energética de la caldera 3.

Tabla 36. *Correlación de Pearson entre variables de estudio.*

Variables	Sistema de generación de vapor	Eficiencia energética
Sistema de generación de vapor – Pearson.	1	0,812
Sig. Bilateral.	—	0,004
N.	10	10
Eficiencia energética – Pearson.	0,812	1
Sig. Bilateral.	0,004	—
N.	10	10

Nota. Elaborado por la autora.

Los resultados permiten ver que el registro de operación, el control del consumo, los procedimientos, el mantenimiento y el reporte de novedades guardan relación con el desempeño energético de la caldera. Sin embargo, lo encontrado corresponde a una asociación entre las variables y no significa que una de ellas provoque directamente el comportamiento de la otra, ya que el estudio tiene un alcance descriptivo-correlacional.

3.2. Desarrollo de la metodología del proyecto

Revisión literaria aplicada al diagnóstico

La revisión literaria permitió reconocer metodologías, indicadores y herramientas aplicables al análisis energético de sistemas industriales de vapor. A partir del capítulo I se identificó que el diagnóstico energético, la línea base, los indicadores EnPIs, el análisis de flujo, la revisión de pérdidas térmicas y las herramientas de priorización son pertinentes para evaluar la caldera 3.

En el capítulo III, la revisión literaria se utiliza como soporte para desarrollar el diagnóstico aplicado. Por ello, no se repite la matriz bibliométrica, sino que se emplean sus resultados para justificar la selección de indicadores, la construcción de la línea base, el análisis de emisiones y la formulación del plan de optimización energética.

Caso de estudio

El caso de estudio corresponde a la caldera 3 de la Planta Generación de la Refinería La Libertad. Esta unidad fue seleccionada porque forma parte del sistema de generación de vapor, utiliza fuel oil como combustible principal y presenta registros técnicos asociados a emisiones, operación y consumo energético. Su evaluación permite analizar la relación entre el sistema de generación de vapor y la eficiencia energética mediante indicadores técnicos, ambientales y económicos.

Tabla 37. *Delimitación del caso de estudio.*

Elemento	Descripción
Caso de estudio.	Caldera 3 de la Planta Generación.
Empresa.	EP Petroecuador.
Instalación.	Refinería La Libertad.
Área.	Planta Generación.
Combustible.	Fuel oil.
Tipo de análisis.	Diagnóstico energético descriptivo-correlacional.
Periodo considerado.	Junio 2025 – mayo 2026.
Variables de análisis.	Sistema de generación de vapor y eficiencia energética.
Información técnica considerada.	Consumo de fuel oil, vapor producido, presión, temperatura, condensado, emisiones, costos y mantenimiento.

Nota. Elaborado por la autora.

Análisis de uso y consumo de energía

El análisis de uso y consumo determinan las fuentes energéticas relacionadas con la operación de la caldera 3. En el sistema de generación de vapor, el uso significativo de energía corresponde al fuel oil utilizado en la combustión. De forma complementaria,

existen consumos eléctricos auxiliares asociados a bombas, ventiladores, instrumentación, iluminación, sistemas de control y equipos de apoyo.

3.2.1.1. Tipos de energía utilizada

La Tabla 37 detalla que el fuel oil constituye el uso significativo de energía dentro del diagnóstico. La energía eléctrica es secundaria, pero debe considerarse en cargas auxiliares y posibles oportunidades complementarias de ahorro.

Tabla 38. *Tipos de energía utilizada en el sistema de generación de vapor.*

Tipo de energía	Uso principal	Aplicación en el estudio
Fuel oil.	Combustible principal de la caldera 3.	Fuente energética primaria para producir vapor.
Energía térmica.	Calor generado por combustión.	Se transforma en energía útil del vapor.
Energía eléctrica.	Alimentación de bombas, ventiladores, instrumentación y control.	Consumo auxiliar del sistema de generación.
Vapor.	Energía útil generada por la caldera.	Producto energético evaluado mediante indicadores.
Condensado.	Retorno térmico parcial al sistema.	Reduce el requerimiento energético del agua de alimentación.

Nota. Elaborado por la autora.

3.2.1.2. Consumo de energía y registros mensuales

Para construir la línea base energética se utilizaron los registros mensuales comprendidos entre junio 2025 – mayo 2026. Con esta serie fue posible revisar el comportamiento de la caldera 3 durante doce meses completos, considerando de manera conjunta el consumo de fuel oil, la producción de vapor, las horas de operación, la presión, la temperatura y el retorno de condensado. Al ordenar la información por mes se pueden observar los cambios que presenta el equipo durante el periodo y obtener indicadores energéticos que luego pueden compararse entre sí.

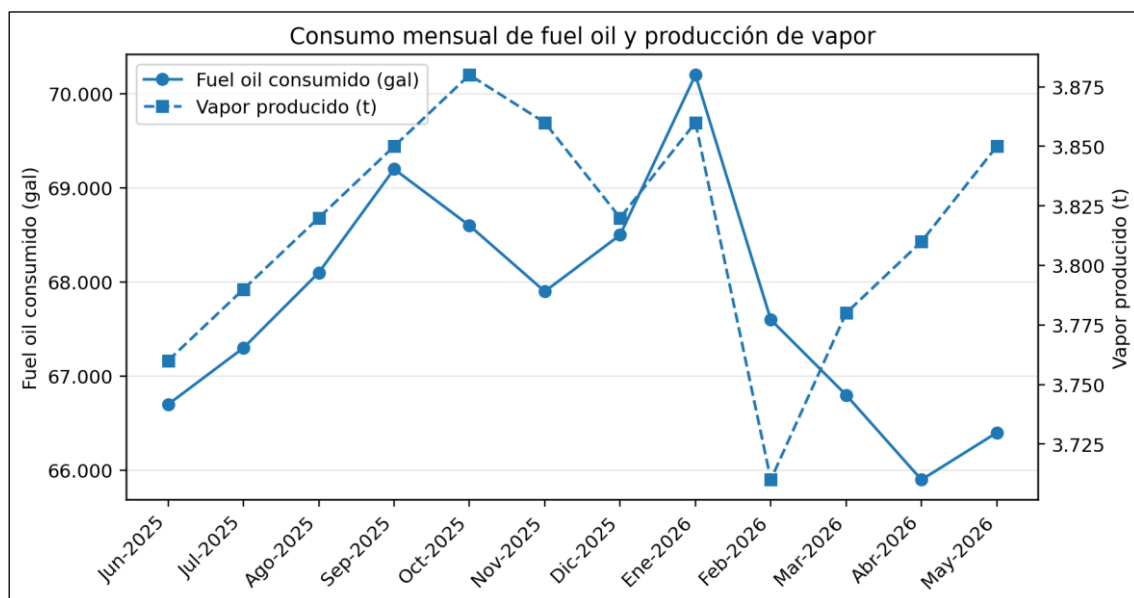
La Tabla 38 presenta los registros mensuales de la caldera 3 correspondientes al periodo analizado. Enero de 2026 fue el mes con mayor consumo de fuel oil, mientras que en abril de 2026 se registró el valor más bajo. En los doce meses considerados se produjo un total de 45.790 toneladas de vapor y se consumieron 813.200 galones de fuel oil.

Tabla 39. Registros mensuales para la línea base energética de la caldera 3.

Mes	Fuel oil consumido (gal)	Vapor producido (t)	Horas de operación	Presión promedio (psi)	Temperatura promedio (°C)	Condensado retornado (t)
Jun-2025	66.700	3.760	426	150	185	1.500
Jul-2025	67.300	3.790	432	150	185	1.515
Ago-2025	68.100	3.820	438	150	186	1.520
Sep-2025	69.200	3.850	440	151	186	1.510
Oct-2025	68.600	3.880	436	150	185	1.540
Nov-2025	67.900	3.860	434	150	185	1.555
Dic-2025	68.500	3.820	430	150	185	1.520
Ene-2026	70.200	3.860	448	151	186	1.500
Feb-2026	67.600	3.710	420	150	185	1.450
Mar-2026	66.800	3.780	432	149	184	1.510
Abr-2026	65.900	3.810	430	150	185	1.540
May-2026	66.400	3.850	438	150	185	1.580
Total / promedio	813.200	45.790	5.204	150	185	18.240

Nota. Elaborado por la autora.

Figura 17. Consumo mensual de fuel oil y producción de vapor.



Nota. Elaborado por la autora.

3.2.1.3. Identificación de áreas de la empresa

Para el diagnóstico energético se consideran las áreas operativas relacionadas con la generación y uso de vapor. Aunque la investigación se delimita a la caldera 3, el sistema de generación de vapor debe analizarse de manera integrada, debido a que el rendimiento del equipo puede relacionarse con demanda, distribución, retorno de condensado y pérdidas.

Tabla 40. Áreas vinculadas con el diagnóstico energético.

Área	Relación con el estudio	Tipo de información requerida
Planta Generación.	Área donde se ubica la caldera 3.	Fuel oil, vapor, presión, temperatura y horas.
Operación de calderas.	Control directo del sistema de vapor.	Registros operativos, novedades y parámetros.
Mantenimiento.	Soporte técnico del equipo y líneas auxiliares.	Fugas, purgas, aislamiento, limpieza e intervenciones.
Gestión Ambiental y Laboratorio.	Monitoreo de emisiones de fuentes fijas.	CO, NO _x , SO ₂ y cumplimiento normativo.
Control técnico / Supervisión.	Seguimiento de indicadores y reportes.	Línea base, EnPIs, costos y priorización.
Usuarios de vapor.	Áreas que demandan energía térmica.	Demanda de vapor, retornos y pérdidas.

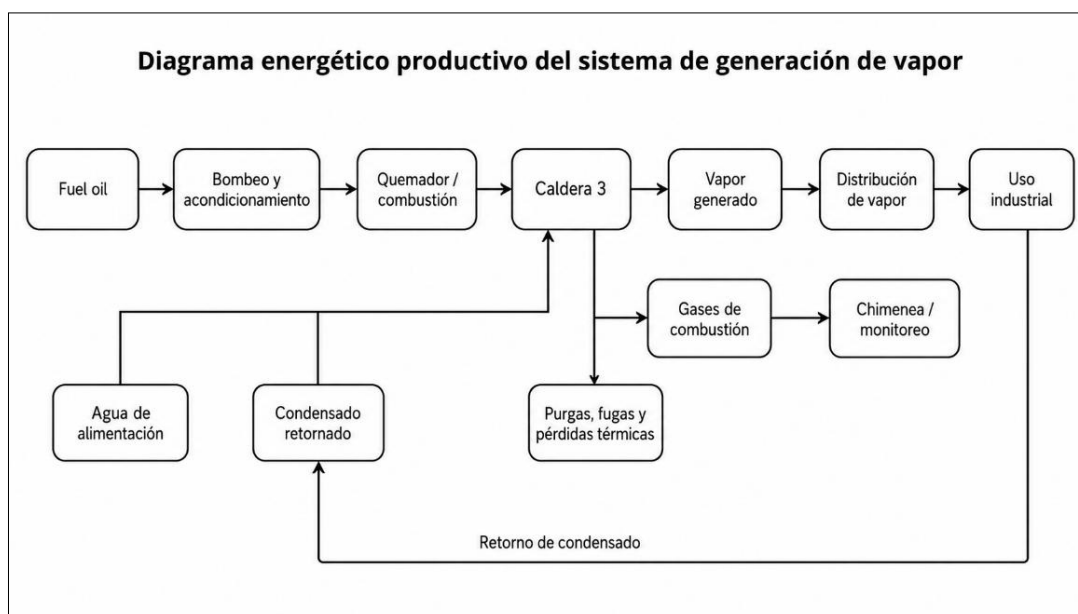
Nota. Elaborado por la autora.

3.2.1.4. Distribución de áreas y diagrama energético productivo

El diagrama energético productivo representa las entradas, transformaciones, salidas y pérdidas del sistema de generación de vapor. En el caso de la caldera 3, la entrada energética principal corresponde al fuel oil, mientras que las salidas corresponden al vapor útil, gases de combustión, purgas, pérdidas térmicas y condensado.

La Figura 18 muestra que la eficiencia energética de la caldera 3 depende de la relación entre combustible, agua de alimentación, combustión, producción de vapor, distribución, recuperación de condensado y pérdidas. Esta representación identifica los puntos donde deben aplicarse indicadores y acciones de optimización.

Figura 18. Diagrama energético productivo del sistema de generación de vapor.



Nota. Elaborado por la autora.

3.2.1.5. Identificación de usos significativos de la energía

El uso significativo de energía corresponde al consumo de fuel oil utilizado para producir vapor en la caldera 3. Este consumo representa la principal entrada energética del sistema y tiene relación directa con costos, emisiones y desempeño térmico. La energía eléctrica auxiliar también se considera, aunque su participación es menor respecto a la energía térmica del combustible.

Tabla 41. *Usos significativos de energía en la caldera 3.*

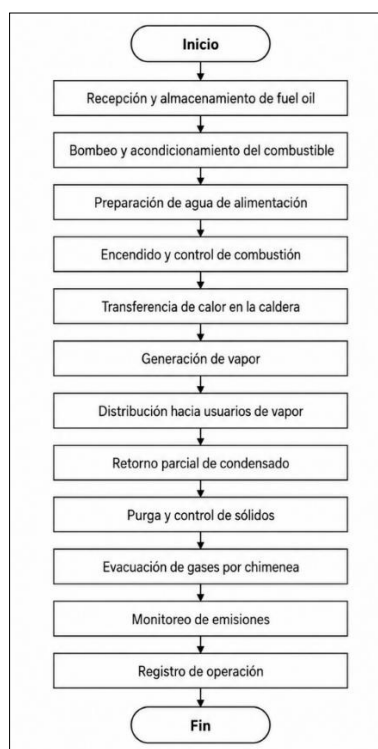
Uso energético	Fuente	Participación estimada	Justificación
Generación de vapor.	Fuel oil.	.95 %	Principal consumo energético del sistema.
Bombeo de agua de alimentación.	Electricidad.	2 %	Requiere operación continua o frecuente.
Bombeo y acondicionamiento de fuel oil.	Electricidad.	1 %	Apoya el suministro de combustible.
Instrumentación, control e iluminación.	Electricidad.	1 %	Soporte operativo del sistema.
Ventilación y equipos auxiliares.	Electricidad.	1 %	Apoyo a combustión y seguridad operativa.

Nota. Elaborado por la autora.

3.2.1.6. Diagrama de flujo del proceso productivo

Como se puede observar en la Figura 19, el diagrama de flujo evidencia la secuencia operativa del sistema. En este proceso, los puntos críticos para la eficiencia energética se relacionan con el consumo de fuel oil, la combustión, la transferencia de calor, el retorno de condensado, las purgas, las fugas y la evacuación de gases.

Figura 19. Diagrama de flujo del proceso de generación de vapor.



Nota. Elaborado por la autora.

3.2.1.7. Fichas técnicas de equipos

La ficha técnica tiene por objetivo organizar la información básica de la caldera 3 y de los equipos auxiliares vinculados con la generación de vapor. Esta información debe validarse con documentos internos de mantenimiento y operación.

Tabla 42. Ficha técnica de la caldera 3.

Parámetro	Descripción
Equipo.	Caldera 3.
Área.	Planta Generación.
Codificación de fuente.	C3RLL / Caldera 3.
Tipo de combustible.	Fuel oil.
Capacidad nominal estimada.	30 t/h de vapor.
Presión promedio de operación.	150 psi.
Temperatura promedio de operación.	185 °C.
Régimen operativo.	Operación según demanda de planta.
Sistema asociado.	Generación y distribución de vapor.
Variables monitoreadas.	CO, NO _x , SO ₂ , presión, temperatura, fuel oil y vapor.
Fuente documental.	Informes técnicos y registros operativos del estudio.

Nota. Elaborado por la autora.

Tabla 43. Equipos auxiliares vinculados con la caldera 3.

Equipo auxiliar	Función	Variable asociada
Bomba de agua de alimentación.	Suministro de agua hacia la caldera.	Caudal, presión, temperatura.

Bomba de fuel oil.	Transporte del combustible hacia el quemador.	Consumo, presión, temperatura.
Quemador.	Combustión del fuel oil.	CO, O ₂ , NO _x , SO ₂ , exceso de aire.
Ventilador / sistema de aire.	Suministro de aire para combustión.	Exceso de aire, estabilidad de llama.
Chimenea.	Evacuación de gases de combustión.	Temperatura, emisiones.
Trampas de vapor.	Descarga de condensado y control de pérdidas.	Retorno de condensado.
Instrumentación.	Medición y control operativo.	Presión, temperatura, flujo y alarmas.

Nota. Elaborado por la autora.

Aplicación de fórmulas e indicadores de desempeño energético

Los indicadores de desempeño transforman los registros operativos en resultados comparables. Para este estudio se aplican seis indicadores: consumo específico de fuel oil, vaporización específica, eficiencia térmica, índice SO₂/límite, costo específico de vapor y retorno de condensado. Estos indicadores evalúan el desempeño energético, económico y ambiental de la caldera 3 durante el periodo junio 2025 – mayo 2026.

Tabla 44. Fórmulas aplicadas en el diagnóstico energético.

Indicador	Fórmula	Unidad
Consumo específico de fuel oil.	$\frac{\text{Fuel oil consumido}}{\text{Vapor producido}}$	$\frac{\text{gal}}{\text{t vapor}}$
Vaporización específica.	$\frac{\text{Vapor producido}}{\text{Fuel oil consumido}}$	$\frac{\text{t vapor}}{\text{gal}}$
Eficiencia térmica.	$\left[\frac{\text{Vapor producido} \times \Delta h}{\text{Fuel oil consumido} \times \text{PCI}} \right] \times 100$	%
Índice SO ₂ /límite.	$\frac{\text{SO}_2 \text{ medido}}{\text{Límite permisible}}$	adimensional
Costo específico de vapor.	$\frac{\text{Costo del fuel oil}}{\text{Vapor producido}}$	$\frac{\text{USD}}{\text{t vapor}}$
Retorno de condensado.	$\frac{\text{Condensado retornado}}{\text{Vapor generado}} \times 100$	%

Nota. Elaborado por la autora.

Para el cálculo de la eficiencia térmica se consideró un poder calorífico inferior del fuel oil de 0,1583 GJ/gal y un diferencial entálpico de 2,36 GJ/t de vapor. Estos valores permiten relacionar la energía suministrada por el combustible con la energía útil contenida en el vapor generado.

Aplicación del balance térmico anual de la caldera 3

Se aplicó el balance anual con el volumen real de Fuel Oil y la producción real de vapor de la línea base. El cálculo muestra cuánta energía ingresó al sistema, cuánta se aprovechó en el vapor y qué fracción quedó asociada a las pérdidas globales de combustión, purgas, transferencia y distribución.

Tabla 45. Balance térmico anual aplicado a la caldera 3.

Concepto	Ecuación aplicada	Resultado	Interpretación
Energía suministrada por Fuel Oil	$813.200 \text{ gal/año} \times 0,1583 \text{ GJ/gal}$	128.729,56 GJ/año	Energía anual que ingresa a la caldera.
Energía útil del vapor	$45.790 \text{ t/año} \times 2,36 \text{ GJ/t}$	108.064,40 GJ/año	Energía transferida al vapor generado.
Pérdida energética global	$128.729,56 - 108.064,40$	20.665,16 GJ/año	Conjunto de pérdidas.
Eficiencia térmica	$108.064,40 / 128.729,56 \times 100$	83,95 %	Valor base utilizado en el escenario MEASUR.

Nota. Elaborado por la autora a partir de 813.200 gal/año de Fuel Oil, 45.790 t/año de vapor, PCI de 0,1583 GJ/gal y diferencial entálpico de 2,36 GJ/t.

El resultado de 83,95 % significa que, de cada 100 unidades de energía aportadas por el Fuel Oil, 83,95 unidades se reflejaron como energía útil del vapor. Las 16,05 unidades restantes representan la oportunidad real de mejora del sistema. Por esta razón, la propuesta no se limita al quemador: incorpora purgas, condensado, fugas, aislamiento y pérdidas en el cabezal de vapor.

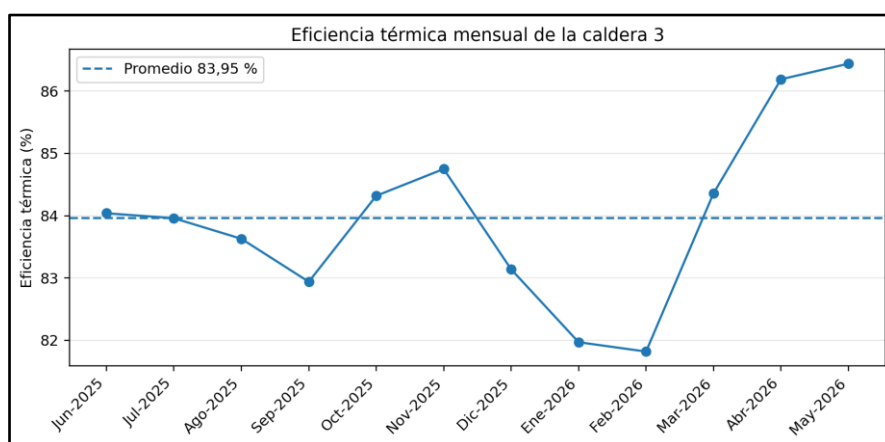
3.2.1.8. Resultados de indicadores de desempeño

Tabla 46. Indicadores mensuales de desempeño energético.

Mes	Consumo específico (gal/t)	Vaporización específica (t/gal)	Eficiencia térmica (%)	Costo específico de vapor (USD/t)	Retorno de condensado (%)
Jun-2025	17,74	0,056	84,04	29,80	39,89
Jul-2025	17,76	0,056	83,96	29,83	39,97
Ago-2025	17,83	0,056	83,63	29,95	39,79
Sep-2025	17,97	0,056	82,94	30,20	39,22
Oct-2025	17,68	0,057	84,32	29,70	39,69
Nov-2025	17,59	0,057	84,75	29,55	40,28
Dic-2025	17,93	0,056	83,14	30,13	39,79
Ene-2026	18,19	0,055	81,97	30,55	38,86
Feb-2026	18,22	0,055	81,82	30,61	39,08
Mar-2026	17,67	0,057	84,36	29,69	39,95
Abr-2026	17,30	0,058	86,19	29,06	40,42
May-2026	17,25	0,058	86,44	28,97	41,04
Promedio	17,76	0,056	83,95	29,84	39,83

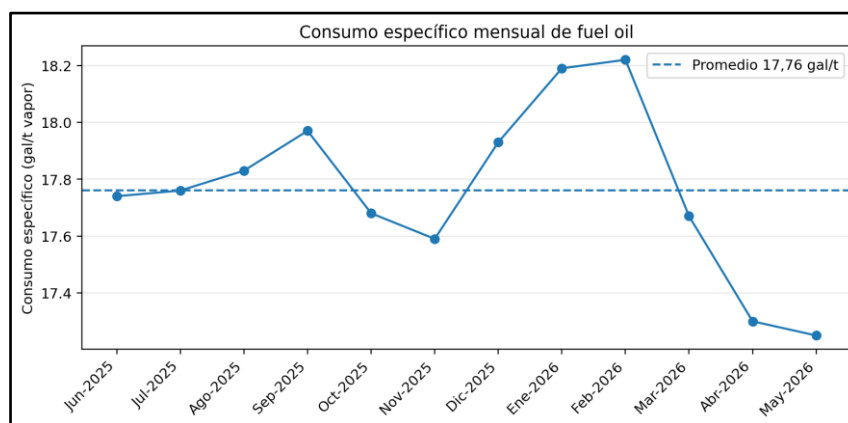
Nota. Elaborado por la autora.

Figura 20. *Eficiencia térmica mensual de la caldera 3.*



Nota. Elaborado por la autora.

Figura 21. *Consumo específico mensual de fuel oil.*



Nota. Elaborado por la autora.

La Figura 20 y la Figura 21 permiten revisar el comportamiento de los principales indicadores de la caldera 3. El consumo específico promedio obtenido fue de 17,76 gal/t de vapor, mientras que la eficiencia térmica promedio llegó a 83,95 %. Al comparar los meses, enero y febrero de 2026 presentan los resultados menos favorables, con un consumo específico más alto y una eficiencia térmica menor. En cambio, abril y mayo de 2026 muestran un mejor comportamiento relativo, debido a que registran menor consumo específico, mayor vaporización específica y una eficiencia térmica más alta.

3.2.1.9. Tabla de eficiencia de los periodos de línea base

De acuerdo con la Tabla 45, el periodo diciembre 2025 – febrero 2026 es el que necesita mayor atención técnica dentro de la línea base, ya que en estos meses se concentra la menor eficiencia térmica del periodo estudiado. Este comportamiento

también coincide con un mayor consumo específico y con los registros de SO₂ observados en la caldera 3.

Tabla 47. *Clasificación de periodos según eficiencia térmica.*

Periodo	Eficiencia térmica promedio	Clasificación	Observación
Jun-2025 a Ago-2025	83,88 %	Desempeño medio.	Operación estable, con consumo específico cercano al promedio.
Sep-2025 a Nov-2025	84,00 %	Desempeño medio.	Septiembre presenta menor eficiencia relativa dentro del trimestre.
Dic-2025 a Feb-2026	82,31 %	Bajo desempeño relativo.	Mayor consumo específico y mayores desviaciones de SO ₂ .
Mar-2026 a May-2026	85,66 %	Mejor desempeño relativo	Menor consumo específico y mejor retorno de condensado.

Nota. Elaborado por la autora.

Análisis exergetico global aplicado a la caldera 3

El balance de Primera Ley se complementó con una evaluación exergetica global para diferenciar la cantidad de energía contenida en el Fuel Oil de la calidad energética que llega al vapor. Se tomó como estado de referencia el ambiente a 25 °C y 1 atm. Para el vapor saturado a 150 psig y 365,99 °F se utilizaron las propiedades de agua y vapor de IAPWS-IF97; la exergía química del Fuel Oil se estimó mediante el factor 1,04 aplicado al PCI.

Tabla 48. *Balance exergetico global aplicado a la caldera 3.*

Concepto	Base de cálculo	Resultado	Lectura técnica
Exergía química del Fuel Oil	$1,04 \times 128.729,56 \text{ GJ/año}$	133.878,74 GJ/año	Potencial de trabajo del combustible que ingresa al sistema.
Exergía específica del vapor	$h - h_0 - T_0(s - s_0)$	836,20 kJ/kg	Propiedad del vapor saturado a 150 psig respecto al ambiente.
Exergía física anual del vapor	$45.790.000 \text{ kg/año} \times 836,20 \text{ kJ/kg}$	38.289,49 GJ/año	Calidad útil entregada por el vapor al proceso.
Rendimiento exergetico global	$38.289,49 / 133.878,74 \times 100$	28,60 %	Aprovechamiento de la calidad energética del Fuel Oil.
Diferencia exergetica global	$133.878,74 - 38.289,49$	95.589,25 GJ/año	Irreversibilidades y exergía no aprovechada en el límite global.

Nota. Elaborado por la autora con propiedades IAPWS-IF97 para vapor saturado a 150 psig y estado ambiente de 25 °C y 1 atm.

La eficiencia térmica de 83,95 % y el rendimiento exergetico de 28,60 % no se contradicen: la primera mide la conservación de energía y la segunda mide la capacidad del vapor para producir trabajo útil. La diferencia exergetica global se interpreta como

una señal de prioridad para el control de combustión, el aprovechamiento del calor de gases, la reducción de purgas y la recuperación de condensado. No se atribuye toda la diferencia a un único equipo, porque corresponde al comportamiento conjunto de la caldera y del sistema de vapor.

Análisis ambiental de emisiones

Para revisar el comportamiento ambiental de la caldera 3 se utilizaron los registros mensuales de seguimiento de emisiones. En el diagnóstico se consideran los parámetros CO, NO_x y SO₂, expresados en mg/Nm³, y se comparan con los límites aplicables a fuentes fijas de combustión relacionadas con actividades hidrocarburíferas. Como referencia normativa principal se utiliza el Acuerdo Ministerial No. 091, publicado en el Registro Oficial No. 430, donde se establecen los límites máximos permisibles de emisiones a la atmósfera para fuentes fijas hidrocarburíferas. Además, el Anexo 3 del Libro VI del TULSMA, reformado mediante Acuerdo Ministerial No. 097-A, reconoce la aplicación de este acuerdo para este tipo de fuentes (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

Para realizar las comparaciones se tomaron los límites que aparecen en los informes mensuales de monitoreo de gases de fuentes fijas de combustión de la Refinería La Libertad para los equipos de Planta Generación que utilizan fuel oil. En estos reportes se trabaja con CO = 50 mg/Nm³, NO_x = 850 mg/Nm³ y SO₂ = 2.004 mg/Nm³. Los datos están presentados en condiciones normales y base seca, considerando también la corrección de oxígeno de referencia que se utiliza en dichos informes.

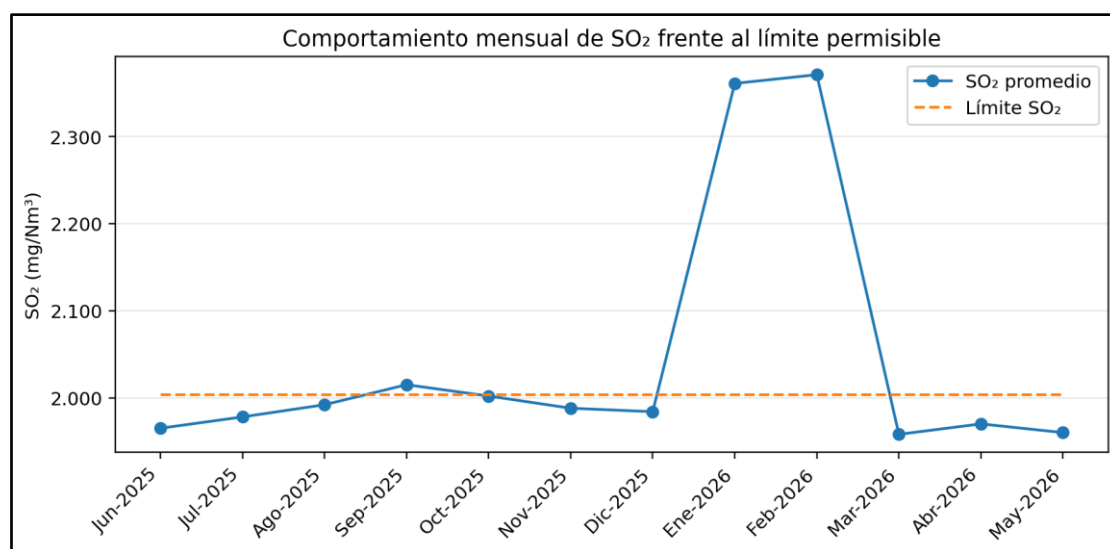
La indicación “sobre el límite” se emplea cuando el resultado obtenido queda por encima del valor utilizado como referencia en los informes. Para revisar específicamente el SO₂ se utiliza la relación SO₂/límite. Si el resultado supera 1, el valor está por encima del límite; cuando se encuentra en 1 o muy próximo a este valor, la condición necesita seguimiento; y si queda por debajo de 1, el resultado se encuentra dentro del criterio utilizado para la comparación.

Al revisar la Tabla 46, el SO₂ presenta los resultados que necesitan mayor seguimiento. Los promedios de enero y febrero de 2026 quedaron por encima de 2.004 mg/Nm³. En los otros meses los registros permanecieron próximos a este valor, aunque en algunos periodos también aparecieron desviaciones semanales. En cambio, los registros de CO y NO_x no alcanzaron los límites referenciales considerados durante el análisis.

Tabla 49. Resultados mensuales de emisiones de la caldera 3.

Mes	CO promedio (mg/Nm ³)	NO _x promedio (mg/Nm ³)	SO ₂ promedio (mg/Nm ³)	SO ₂ máximo (mg/Nm ³)	Mediciones sobre límite SO ₂	Condición
Jun-2025	16,50	410	1.965	2.010	1 de 4	Cercano al límite.
Jul-2025	18,25	415	1.978	2.022	1 de 4	Cercano al límite.
Ago-2025	15,75	418	1.992	2.040	2 de 4	Cercano al límite, con desviaciones semanales.
Sep-2025	22,00	422	2.015	2.058	2 de 4	Supera ligeramente el límite promedio.
Oct-2025	20,50	418	2.002	2.045	2 de 4	Cercano al límite.
Nov-2025	18,75	416	1.988	2.030	1 de 4	Cercano al límite.
Dic-2025	12,50	420	1.984	2.038	3 de 4	Cumplimiento promedio cercano al límite; desviaciones semanales.
Ene-2026	37,00	419	2.361	2.367	3 de 3	No cumple en SO ₂ .
Feb-2026	6,75	440	2.371	2.379	4 de 4	No cumple en SO ₂ .
Mar-2026	17,25	402	1.958	2.122	1 de 4	Cumplimiento promedio; una desviación semanal.
Abr-2026	14,80	408	1.970	2.010	1 de 4	Cercano al límite.
May-2026	13,60	406	1.960	1.998	0 de 4	Bajo el límite.

Nota. Elaborado por la autora.

Figura 22. Comportamiento mensual de SO₂ frente al límite permisible.

Nota. Elaborado por la autora.

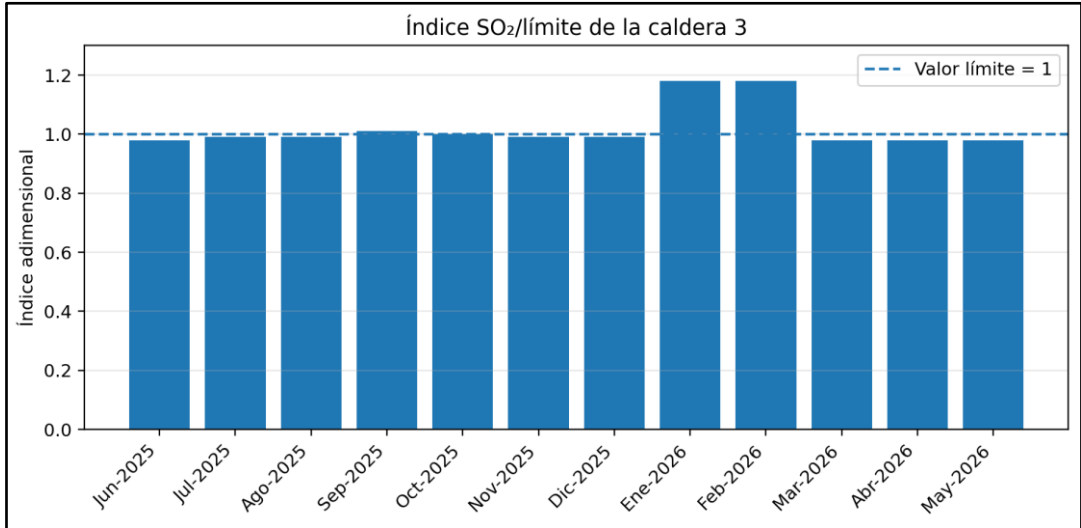
Tabla 50. Índice SO₂/límite de la caldera 3.

Mes	SO ₂ promedio (mg/Nm ³)	Límite SO ₂ (mg/Nm ³)	Índice SO ₂ /límite	Interpretación
Jun-2025	1.965	2.004	0,98	Bajo el límite, cercano al valor permisible.
Jul-2025	1.978	2.004	0,99	Cercano al límite.
Ago-2025	1.992	2.004	0,99	Cercano al límite.
Sep-2025	2.015	2.004	1,01	Supera ligeramente el límite.
Oct-2025	2.002	2.004	1,00	Cercano al límite.
Nov-2025	1.988	2.004	0,99	Cercano al límite.
Dic-2025	1.984	2.004	0,99	Cercano al límite.
Ene-2026	2.361	2.004	1,18	Supera el límite.
Feb-2026	2.371	2.004	1,18	Supera el límite.
Mar-2026	1.958	2.004	0,98	Bajo el límite promedio.

Abr-2026	1.970	2.004	0,98	Bajo el límite, cercano al valor permisible.
May-2026	1.960	2.004	0,98	Bajo el límite.

Nota. Elaborado por la autora.

Figura 23. Índice SO₂/límite de la caldera 3



Nota. Elaborado por la autora.

El índice SO₂/límite muestra que la caldera 3 trabaja en una condición ambiental cercana al valor permisible durante gran parte del periodo analizado. Los meses de enero y febrero de 2026 presentan la mayor desviación, con un índice de 1,18. Este comportamiento justifica la necesidad de relacionar emisiones con calidad del fuel oil, combustión, mantenimiento, producción de vapor e indicadores energéticos.

Relación entre emisiones, calidad del Fuel Oil y control de combustión

Los promedios mensuales permiten identificar la tendencia, pero las mediciones semanales muestran con mayor claridad la condición operativa de la caldera 3. Por ello se consolidaron los resultados documentados en los informes de diciembre de 2025 y enero, febrero y marzo de 2026. Esta verificación se incorpora en el cuerpo de resultados para sustentar la prioridad de intervención sobre el SO₂.

Tabla 51. Verificación de emisiones entre diciembre de 2025 y marzo de 2026.

Periodo	CO prom.	NOx prom.	SO2 prom.	SO2 máx.	SO2 sobre 2.004	Condición
Dic-2025	12,50	420,00	1.983,75	2.038	3 de 4	Promedio bajo el límite, con tres desviaciones.
Ene-2026	37,00	418,67	2.361,00	2.367	3 de 3	No cumple en todas las mediciones.
Feb-2026	6,75	440,00	2.371,00	2.379	4 de 4	No cumple en todas las mediciones.

Periodo	CO prom.	NOx prom.	SO2 prom.	SO2 máx.	SO2 sobre 2.004	Condición
Mar-2026	17,25	401,75	1.957,50	2.122	1 de 4	Promedio bajo el límite, con una desviación.
Total	17,13	420,20	2.155,47	2.379	11 de 15	Índice promedio SO2/límite: 1,08.

Nota. Concentraciones en mg/Nm³. Elaborado por la autora con los informes mensuales de monitoreo de gases de fuentes fijas de combustión de la Refinería La Libertad.

En el periodo consolidado, 11 de 15 mediciones de SO₂ superaron el valor de 2.004 mg/Nm³; esto representa 73,33 % de las verificaciones disponibles. El promedio conjunto alcanzó 2.155,47 mg/Nm³, equivalente a un índice SO₂/límite de 1,08. En contraste, el CO se mantuvo entre 0 y 42 mg/Nm³ y el NO_x entre 388 y 454 mg/Nm³, ambos por debajo de sus valores de referencia. Por tanto, la acción prioritaria no consiste en una corrección general de todas las emisiones, sino en controlar específicamente la relación entre calidad del Fuel Oil, limpieza del quemador y condiciones de combustión que afectan al SO₂.

Tabla 52. *Aplicación del control de combustión y calidad del Fuel Oil.*

Variable	Valor base o criterio	Aplicación en la propuesta	Control de resultado
Azufre del Fuel Oil	1,59 % en peso; la acción correctiva señala un máximo de 1 %.	Aceptar cada lote con certificado de azufre y gestionar mezcla o sustitución cuando supere el criterio.	SO ₂ promedio y número de mediciones sobre el límite.
PCI del Fuel Oil	0,1583 GJ/gal.	Actualizar el balance cuando cambie el PCI certificado del combustible recibido.	Eficiencia térmica y consumo específico.
Eficiencia de combustión	83,95 % base; 87,05 % en el escenario MEASUR.	Revisar lanzas, quemador y relación aire-combustible con carga controlada.	Reducción de Fuel Oil por tonelada de vapor.
CO y NOx	CO: 0-42 mg/Nm ³ ; NOx: 388-454 mg/Nm ³ en el periodo verificado.	Mantener ambos parámetros dentro de referencia durante el ajuste del quemador.	CO ≤ 50 mg/Nm ³ y NOx ≤ 850 mg/Nm ³ .
O ₂ y exceso de aire	Exceso de aire = 100 × O ₂ seco / (21 - O ₂ seco).	Registrar la lectura del analizador durante cada ajuste de combustión.	Estabilidad de la llama, CO, NOx, eficiencia y SO ₂ .

Nota. Elaborado por la autora con la línea base, los informes de emisiones y el acta de acciones correctivas de diciembre de 2025.

La aplicación del control de combustión en el escenario optimizado se representa en MEASUR mediante el aumento de la eficiencia de combustión de 83,95 % a 87,05 %. En planta, esta medida se ejecuta ajustando el quemador con la lectura directa de O₂ y exceso de aire, pero su aceptación se verifica simultáneamente con CO, NO_x y SO₂. Así se evita mejorar el rendimiento a costa de empeorar la condición ambiental de la fuente.

Estimación del consumo actual

La estimación del consumo actual se realizó tomando como base la línea base energética del periodo junio 2025 – mayo 2026. El consumo anual de fuel oil de la caldera 3 alcanza 813.200 galones, con una producción anual de vapor de 45.790 toneladas. Considerando un costo referencial de 1,68 USD/gal, el costo anual del combustible asciende a 1.366.176 USD.

Tabla 53. *Consumo anual actual de fuel oil y vapor.*

Indicador anual	Resultado
Fuel oil consumido.	813.200 gal/año
Vapor producido.	45.790 t/año
Consumo específico promedio.	17,76 gal/t
Eficiencia térmica promedio.	83,95 %
Costo referencial del fuel oil.	1,68 USD/gal
Costo anual del fuel oil.	1.366.176 USD/año
Costo específico promedio del vapor.	29,84 USD/t

Nota. Elaborado por la autora.

La Tabla 48 muestra que el consumo de fuel oil representa el principal componente económico del sistema de generación de vapor. Por ello, la reducción del consumo específico y el mejoramiento del rendimiento térmico pueden generar ahorros relevantes en la operación anual de la caldera 3.

Estimación de consumo futuro

La estimación de consumo futuro se elaboró considerando un escenario de continuidad operativa con incremento de 3 % en la demanda anual y un escenario optimizado con reducción de 7,3 % mediante acciones de mejora energética. Esta proyección compara el comportamiento esperado si no se aplican acciones de optimización frente a un escenario con medidas de control, mantenimiento y recuperación energética.

La Tabla 49 muestra que un incremento de 3 % en la demanda puede elevar el costo anual del fuel oil a 1.407.161 USD. En cambio, el escenario optimizado reduce el consumo proyectado a 776.451 gal/año, generando una reducción económica de 102.723 USD frente al escenario futuro sin optimización.

Tabla 54. *Proyección de consumo futuro de fuel oil.*

Escenario	Fuel oil proyecta	Costo proyectado (USD/año)	Diferencia económica
-----------	-------------------	----------------------------	----------------------

	do (gal/año)		
Escenario actual anual.	813.200	1.366.176	—
Escenario futuro sin optimización (+3 %).	837.596	1.407.161	+40.985
Escenario futuro con optimización.	776.451	1.304.439	-102.723 frente al escenario futuro sin optimización.

Nota. Elaborado por la autora.

Priorización de condiciones críticas

Las condiciones encontradas durante el diagnóstico se ordenaron mediante la matriz GUT, utilizando para cada una los criterios de gravedad, urgencia y tendencia. De esta forma se pudo establecer cuáles necesitaban revisarse primero, sin considerar desde el comienzo que una condición determinada explicara por sí sola el comportamiento observado en la caldera 3.

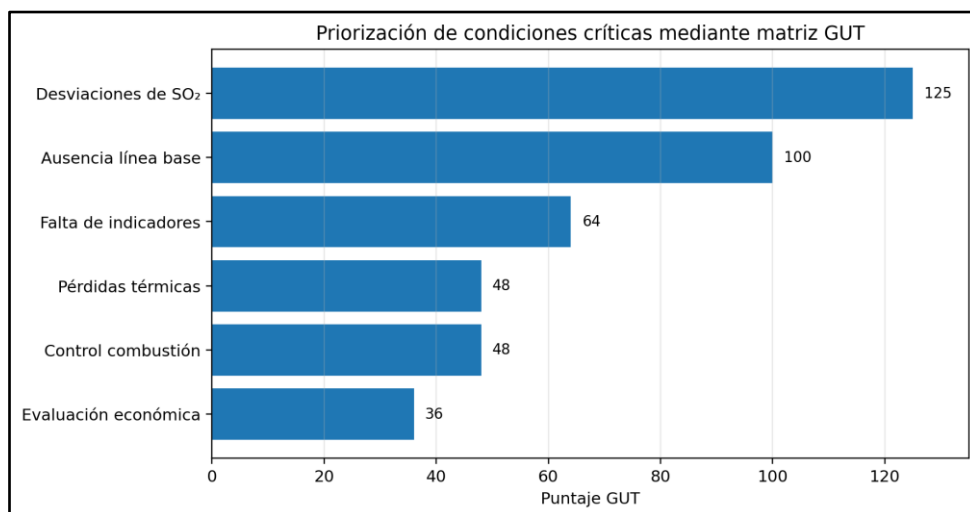
En la Tabla 50 se observa que las desviaciones de SO₂, la falta de una línea base energética y la ausencia de indicadores propios para la caldera 3 quedaron entre los aspectos con mayor prioridad dentro del diagnóstico. A partir de esta priorización se sustenta la elaboración de un plan de optimización enfocado en medición, control, mantenimiento y seguimiento mensual.

Tabla 55. *Matriz GUT de condiciones críticas de la caldera 3.*

Condición crítica	Descripción	G	U	T	Puntaje	Prioridad
Desviaciones de SO ₂ .	Valores mensuales y semanales superiores o cercanos al límite permisible.	5	5	5	125	Alta.
Ausencia de línea base energética consolidada.	Los registros de fuel oil, vapor, emisiones y costos no se integran en una referencia mensual.	5	4	5	100	Alta.
Falta de indicadores por caldera.	No se evidencia seguimiento mensual de consumo específico, eficiencia térmica y costo de vapor.	4	4	4	64	Alta.
Pérdidas térmicas no cuantificadas.	Purgas, fugas, aislamiento y retorno de condensado requieren medición periódica.	4	3	4	48	Media.
Control limitado de combustión.	Requiere seguimiento de exceso de aire, O ₂ , temperatura de gases y mantenimiento de quemadores.	4	3	4	48	Media.
Evaluación económica incompleta.	El costo del vapor no se controla de forma mensual por caldera.	3	3	4	36	Media.

Nota. Elaborado por la autora.

Figura 24. Priorización de condiciones críticas mediante matriz GUT.



Nota. Elaborado por la autora.

Elaboración de la propuesta de optimización energética

La propuesta se plantea con el propósito de mejorar el comportamiento energético, operativo y ambiental de la caldera 3. Durante la investigación estas acciones no fueron aplicadas directamente sobre el equipo; quedaron planteadas para que la empresa pueda revisarlas técnicamente y decidir posteriormente su implementación.

La Tabla 51 presenta las mejoras que se consideraron para el sistema de generación de vapor a partir de los resultados obtenidos. El sistema fotovoltaico se incluyó de manera complementaria, porque el funcionamiento principal de la caldera 3 depende del fuel oil. Por esta razón, la energía solar se plantea solamente para cubrir parte de las cargas eléctricas auxiliares.

Tabla 56. Oportunidades de optimización energética.

Oportunidad	Descripción	Indicador relacionado	Prioridad
Construcción de línea base energética.	Integrar mensualmente fuel oil, vapor, presión, temperatura, horas, emisiones y costos.	Consumo específico, eficiencia térmica.	Alta.
Seguimiento de EnPIs por caldera.	Calcular indicadores de desempeño energético de la caldera 3.	EnPIs, costo específico de vapor.	Alta.
Control de combustión.	Evaluar exceso de aire, oxígeno residual, temperatura de gases y estado del quemador.	SO ₂ /límite, eficiencia térmica.	Alta.
Recuperación de condensado.	Aumentar retorno de condensado para reducir energía requerida en agua de alimentación.	Retorno de condensado, consumo específico.	Media.
Control de purgas.	Revisar frecuencia y condiciones de purga para reducir pérdidas térmicas.	Consumo específico, eficiencia térmica.	Media.
Aislamiento térmico y fugas.	Inspeccionar líneas, válvulas y superficies calientes.	Pérdidas térmicas, costo de vapor.	Media.

Evaluación de economizador.	Analizar recuperación de calor en gases de salida.	Eficiencia térmica, consumo de fuel oil.	Media.
Sistema fotovoltaico auxiliar.	Evaluar generación eléctrica para cargas auxiliares, no para sustituir fuel oil.	Consumo eléctrico auxiliar.	Baja.

Nota. Elaborado por la autora.

Base normativa y técnica de la propuesta

Para estructurar la propuesta se tomó como referencia la norma ISO 50002-1:2025, debido a que establece requisitos y lineamientos generales para desarrollar auditorías energéticas en sistemas, procesos, equipos e instalaciones. En el caso de la caldera 3, esta norma respalda actividades como el levantamiento de información, la revisión del uso y consumo de energía, la identificación de oportunidades de mejora y la presentación de resultados técnicos obtenidos mediante el diagnóstico energético (International Organization for Standardization, 2025).

También se tomó como referencia la norma ISO 50006:2023. Su aplicación dentro del estudio está relacionada con la forma de trabajar los indicadores de desempeño energético y la línea base. Para la caldera 3 estos elementos permiten disponer de una referencia mensual y revisar indicadores EnPIs como consumo específico, eficiencia térmica, retorno de condensado, costo de vapor e índice SO₂/límite (International Organization for Standardization, 2023).

Para complementar los cálculos se trabajó con MEASUR Tool, desarrollado por el U.S. Department of Energy. En este caso se utilizó Steam Assessment, módulo destinado al análisis de sistemas de vapor y que permite revisar variables como flujos, costos y pérdidas, además de comparar alternativas de mejora. Esta herramienta se ajusta al estudio porque la caldera 3 genera vapor mediante el consumo de fuel oil (U.S. Department of Energy, 2026).

Evaluación del consumo energético mediante MEASUR Tool

El análisis en MEASUR Tool se realizó mediante Steam Assessment. El modelo se configuró en unidades imperiales para trabajar con los campos disponibles en el software, entre ellos psig, °F, klb/hr, MMBtu y galones. Se asignó a la evaluación el nombre “Evaluación energética caldera 3 – Refinería La Libertad” y para su construcción se utilizaron los registros de la línea base de junio 2025 – mayo 2026.

Para representar las condiciones de operación se cargaron en el modelo los datos correspondientes a la caldera y al cabezal de vapor. La operación anual se fijó en 5.204

horas. Para el vapor se utilizaron 150 psig de presión y 365,99 °F de temperatura saturada, mientras que el uso de vapor de proceso fue de 19,4 klb/hr. La eficiencia de combustión considerada fue de 83,95 %, junto con una purga de 3 % y un retorno de condensado de 39,83 %. También se ingresaron 180 °F para la temperatura del condensado y 0,1 % para las pérdidas térmicas. En la parte económica se trabajó con 11,20 USD/MMBtu para fuel oil, 0,10 USD/kWh para electricidad y 0,03 USD/gal para agua de reposición.

La Tabla 52 reúne los datos utilizados para configurar el escenario base en el sistema de unidades seleccionado. De esta manera, la presión, temperatura, flujo de vapor y energía pudieron colocarse según las unidades requeridas por Steam Assessment y manteniendo correspondencia con la información de la línea base.

Tabla 57. Datos ingresados en MEASUR Tool para el escenario base.

Parámetro ingresado en MEASUR	Valor utilizado	Criterio de aplicación
Operating hours.	5.204 h/año.	Horas de operación anual de la línea base.
Fuel cost.	11,20 USD/MMBtu.	Costo energético equivalente del fuel oil.
Electricity cost.	0,10 USD/kWh.	Tarifa referencial para cargas auxiliares.
Make-up water temperatura.	77 °F.	Temperatura referencial del agua de reposición.
Make-up water cost.	0,03 USD/gal.	Costo referencial de agua de reposición.
Boiler combustion efficiency.	83,95 %	Eficiencia térmica promedio de la caldera 3.
Blowdown rate.	3 %	Condición base de purga para modelación.
Steam pressure.	150 psig	Presión promedio de operación.
Process steam usage.	19,4 klb/hr	Equivalente a 45.790 t/año de vapor en 5.204 h/año.
Condensate recovery rate.	39,83 %	Promedio de retorno de condensado del diagnóstico.
Condensate return temperatura.	180 °F	Condensado caliente retornado al sistema.
Heat los.	0,1 %	Pérdida térmica de referencia en el cabezal.
Condensing turbine.	No aplica.	El estudio se limita a caldera y sistema de vapor, sin turbina.

Nota. Elaborado por la autora.

El modelo se trabajó sin una turbina de condensación porque el estudio está delimitado al sistema de generación de vapor asociado con la caldera 3. Con esta delimitación, el análisis se concentró en revisar el consumo de energía, los costos y las pérdidas que presenta el sistema, además de las mejoras que podían ser evaluadas.

Escenario optimizado modelado en MEASUR Tool

Una vez configurada la línea base, se preparó un segundo escenario denominado “escenario optimizado – control de combustión y recuperación energética”. En este caso se mantuvo la misma demanda de vapor, ya que el objetivo era cubrir el mismo requerimiento energético, pero reduciendo el consumo y las pérdidas del sistema. Los

cambios aplicados se concentraron en los aspectos que habían sido priorizados durante el diagnóstico: eficiencia de combustión, purgas, recuperación de condensado y pérdidas térmicas.

Tabla 58. *Parámetros en el escenario optimizado de MEASUR Tool.*

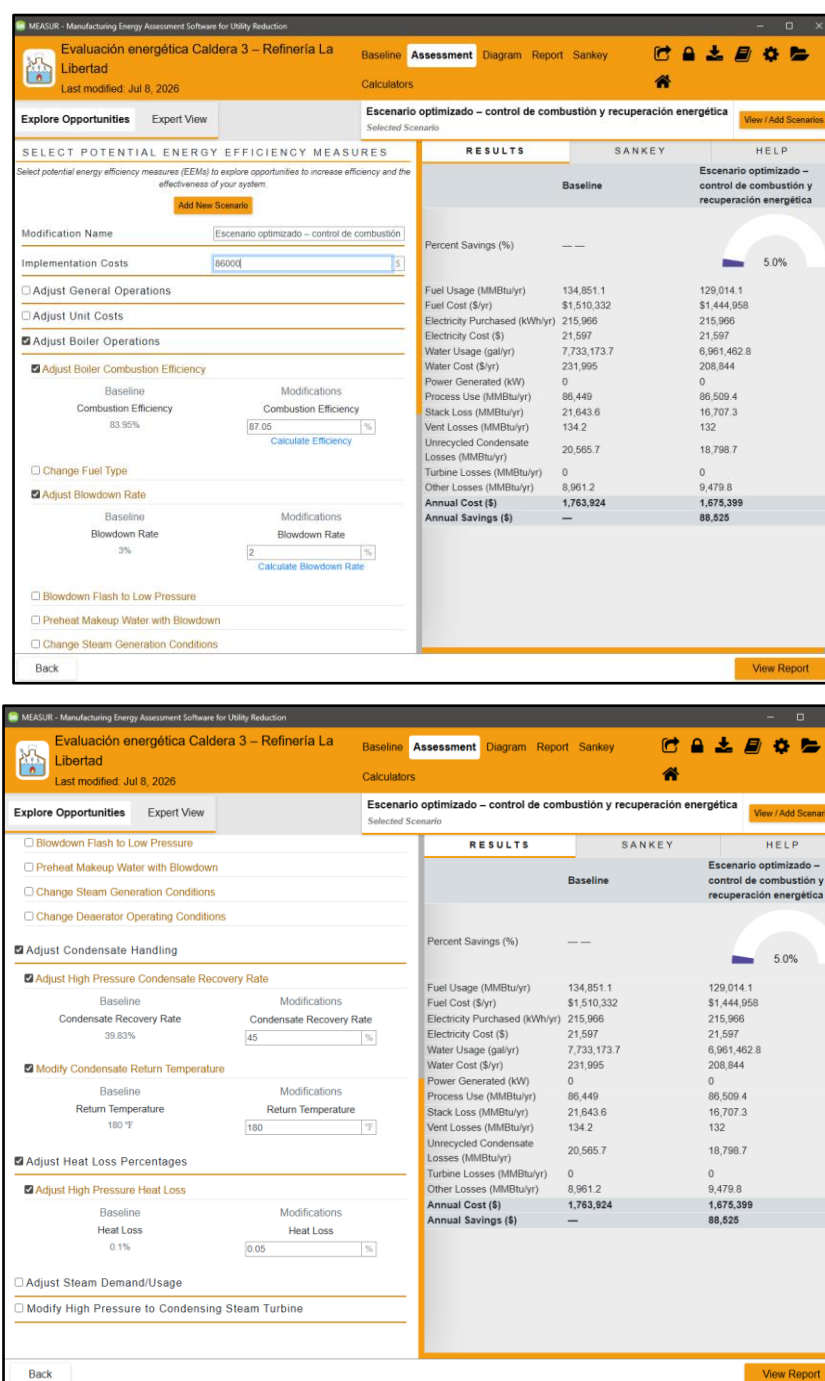
Variable modificada en MEASUR	Condición base	Escenario optimizado	Justificación técnica
Eficiencia de combustión de la caldera.	83,95 %	87,05 %	Mejora por ajuste de combustión, revisión de quemador y control de exceso de aire.
Tasa de purga.	3 %	2 %	Reducción de pérdidas térmicas por control de purgas.
Retorno de condensado.	39,83 %	45 %	Recuperación de energía sensible del condensado.
Temperatura de retorno de condensado.	180 °F	180 °F	Se mantiene como condición de retorno caliente.
Pérdidas térmicas en cabezal.	0,1 %	0,05 %	Mejora por aislamiento, control de fugas y mantenimiento energético.
Costo de implementación.	—	86.000 USD	Inversión térmica considerada para acciones del sistema de vapor.

Nota. Elaborado por la autora.

Para este escenario se ingresó al software una inversión de 86.000 USD correspondiente a las acciones térmicas consideradas en el sistema de vapor. Entre ellas se encuentran la línea base e indicadores, ajuste de combustión, control de purgas, fugas, trampas de vapor, retorno de condensado, aislamiento térmico y evaluación de economizador. La alternativa fotovoltaica se mantuvo fuera de esta modelación y se consideró por separado como apoyo para los consumos eléctricos auxiliares. Esto se debe a que el escenario trabajado en Steam Assessment corresponde específicamente al comportamiento térmico del sistema de vapor.

En las Figuras 25 y 26 se pueden observar los valores que fueron cambiados respecto a la línea base. El requerimiento de vapor no se modificó; los ajustes se realizaron sobre la eficiencia de combustión, la tasa de purga, el retorno de condensado y las pérdidas térmicas. Con estos cambios se evaluó cuánto podía mejorar el sistema manteniendo la misma demanda de vapor.

Figura 25. Escenario optimizado con ajustes de combustión MEASUR Tool.



Nota. Captura del escenario optimizado con retorno de condensado.

Cuantificación del retorno de condensado y de las pérdidas térmicas

El cambio de retorno de condensado de 39,83 % a 45 % se aplicó dentro del escenario optimizado de MEASUR. Para expresar físicamente esta medida, se calculó el volumen adicional de condensado caliente que retorna al sistema y la energía que deja de

requerirse para calentar agua de reposición desde 77 °F hasta la temperatura de retorno de 180 °F.

Tabla 59. *Cálculo del incremento de retorno de condensado en MEASUR.*

Concepto	Línea base	Escenario optimizado	Resultado aplicado
Vapor anual producido	45.790 t/año	45.790 t/año	La demanda de vapor se mantiene constante.
Retorno de condensado	18.240 t/año (39,83 %)	20.605,50 t/año (45 %)	Incremento de 2.365,50 t/año.
Salto térmico del retorno	180 °F - 77 °F	57,22 °C	Diferencia entre condensado y agua de reposición.
Energía sensible recuperable	$m \times C_p \times \Delta T$	565,80 GJ/año	Con C_p del agua de 4,18 kJ/kg °C.
Fuel Oil equivalente	565,80 / 0,8395 / 0,1583	4.258 gal/año	Equivalente térmico antes de pérdidas adicionales.
Ahorro indicativo	4.258 gal/año $\times$ 1,68 USD/gal	7.153 USD/año	Contribución física incluida en el ahorro global modelado.

Nota. Elaborado por la autora. El ahorro indicativo de condensado no se suma de nuevo a los 88.525 USD/año de MEASUR, porque forma parte de las medidas térmicas evaluadas de manera integrada.

La recuperación de condensado reduce simultáneamente el consumo de agua de reposición y la energía que requiere la alimentación de la caldera. De manera complementaria, la reducción de pérdidas de cabezal de 0,1 % a 0,05 % representa la aplicación conjunta de inspección de fugas, sustitución de trampas defectuosas y mejora del aislamiento. Estas medidas no se valoran como actividades aisladas: se aplican como un paquete de conservación de energía dentro del escenario optimizado.

Resultados emitidos por MEASUR Tool

A partir del reporte ejecutivo generado por MEASUR Tool se obtuvieron los resultados correspondientes a la línea base y al escenario optimizado. El programa considera dentro de sus resultados el costo energético, las pérdidas del sistema, el agua de reposición, la recuperación de condensado y el costo anual total. Estos valores se utilizaron como complemento computacional para revisar el comportamiento de la línea base energética.

Tabla 60. *Resultados emitidos por MEASUR Tool.*

Resultado del software	Línea base	Escenario optimizado	Variación
------------------------	------------	----------------------	-----------

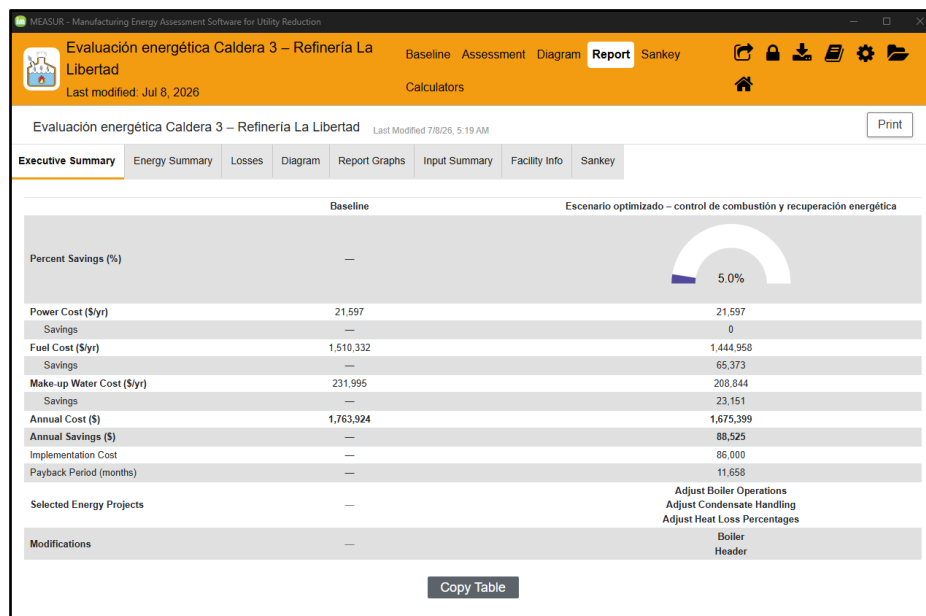
Ahorro porcentual.	—	5,0 %	Mejora global del escenario.
Fuel usage.	134.851,1 MMBtu/año.	129.014,1 MMBtu/año.	-5.837,0 MMBtu/año.
Fuel cost.	1.510.332 USD/año.	1.444.958 USD/año.	-65.373 USD/año.
Electricity purchased.	215.966 kWh/año.	215.966 kWh/año.	Sin modificación en MEASUR.
Make-up water cost.	231.995 USD/año.	208.844 USD/año.	-23.151 USD/año.
Annual cost.	1.763.924 USD/año.	1.675.399 USD/año.	-88.525 USD/año.
Implementation cost.	—	86.000 USD	Inversión térmica del escenario.
Payback period.	—	11,658 meses.	Retorno simple estimado por el software.

Nota. Elaborado por la autora a partir del reporte ejecutivo de MEASUR Tool.

Al comparar ambos escenarios, el consumo energético disminuye de 134.851,1 MMBtu/año a 129.014,1 MMBtu/año, lo que representa un ahorro de 5,0 %. En la parte económica, el costo anual total pasa de 1.763.924 USD/año a 1.675.399 USD/año. La diferencia obtenida corresponde a un ahorro anual estimado de 88.525 USD. Considerando la inversión térmica de 86.000 USD, MEASUR Tool calcula un retorno simple de 11,658 meses.

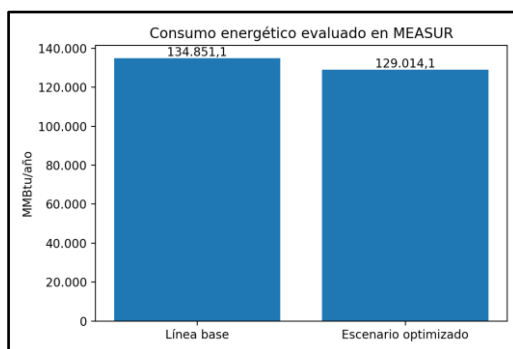
La Figura 27 presenta de forma resumida los resultados obtenidos para el escenario optimizado. El reporte muestra un ahorro global de 5,0 %, mientras que el costo anual total disminuye de 1.763.924 USD/año a 1.675.399 USD/año. Para la inversión térmica evaluada se obtiene un ahorro anual de 88.525 USD y un retorno simple de 11,658 meses.

Figura 26. Reporte ejecutivo del escenario optimizado en MEASUR Tool.



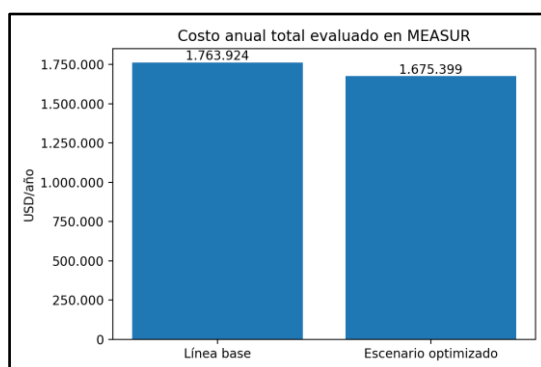
Nota. Captura del reporte ejecutivo del módulo Steam Assessment de MEASUR.

Figura 27. *Consumo energético evaluado en MEASUR Tool.*



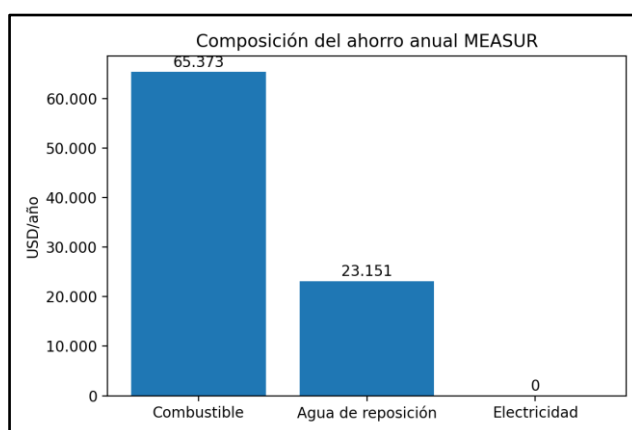
Nota. Elaborado por la autora a partir de los resultados de MEASUR Tool.

Figura 28. *Costo anual total de la línea base y escenario optimizado.*



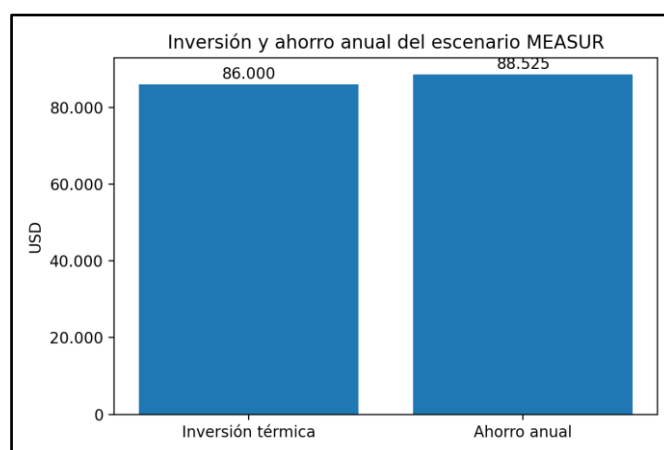
Nota. Elaborado por la autora a partir de los resultados de MEASUR Tool.

Figura 29. *Composición del ahorro anual estimado por MEASUR Tool.*



Nota. Elaborado por la autora a partir de los resultados de MEASUR Tool.

Figura 30. *Inversión térmica y ahorro anual del escenario optimizado.*



Nota. Elaborado por la autora a partir de los resultados de MEASUR Tool.

Interpretación técnica de los resultados del software

La reducción del consumo energético estimada por MEASUR se relaciona principalmente con la mejora de la eficiencia de combustión, la reducción de purgas y el incremento del retorno de condensado. Estas medidas disminuyen las pérdidas por chimenea, agua de reposición y condensado no recuperado, lo cual se refleja en una reducción del costo anual total del sistema de vapor.

El consumo eléctrico comprado se mantiene en 215.966 kWh/año dentro del escenario MEASUR, debido a que no se modificaron cargas eléctricas auxiliares en el módulo Steam Assessment. Por esta razón, el ahorro eléctrico por sistema fotovoltaico debe analizarse como medida complementaria fuera del resultado directo del software.

El resultado de MEASUR complementa la línea base mensual construida a partir de registros históricos. La línea base identifica el comportamiento real mensual de la caldera 3, mientras que MEASUR permite simular un escenario de mejora con variables operativas controladas.

Tabla 61. *Oportunidades de optimización energética.*

Oportunidad	Descripción	Indicador relacionado	Soporte técnico
Construcción de línea base energética.	Integrar mensualmente fuel oil, vapor, presión, temperatura, horas, emisiones y costos.	Consumo específico, eficiencia térmica.	ISO 50006:2023
Seguimiento de EnPIs por caldera.	Calcular indicadores de desempeño energético de la caldera 3.	EnPIs, costo específico de vapor.	ISO 50006:2023
Control de combustión.	Evaluar exceso de aire, oxígeno residual, temperatura de gases y estado del quemador.	SO ₂ /límite, eficiencia térmica.	MEASUR / diagnóstico.

Recuperación de condensado.	Aumentar retorno de condensado para reducir energía requerida en agua de alimentación.	Retorno de condensado, consumo específico.	MEASUR / sistema de vapor.
Control de purgas.	Revisar frecuencia y condiciones de purga para reducir pérdidas térmicas.	Consumo específico, eficiencia térmica.	MEASUR / mantenimiento.
Aislamiento térmico y fugas.	Inspeccionar líneas, válvulas y superficies calientes.	Pérdidas térmicas, costo de vapor.	ISO 50002-1:2025
Evaluación de economizador.	Analizar recuperación de calor en gases de salida.	Eficiencia térmica, consumo de fuel oil	Artículos técnicos / MEASUR.
Sistema fotovoltaico auxiliar.	Evaluar generación eléctrica para cargas auxiliares, sin sustituir fuel oil.	kWh/mes.	Medida complementaria.

Nota. Elaborado por la autora.

Las mejoras consideradas se orientan principalmente hacia los puntos donde el diagnóstico mostró que todavía existen pérdidas o condiciones que pueden controlarse mejor. Las acciones propias del sistema de vapor fueron las que se llevaron al modelo de MEASUR Tool. La alternativa fotovoltaica quedó separada de esta evaluación, ya que su aporte estaría relacionado con los consumos eléctricos auxiliares y no directamente con la generación térmica de vapor.

Descripción de la carga y oportunidad fotovoltaica complementaria

En el sistema, la mayor parte de la energía utilizada proviene del fuel oil que consume la caldera para producir vapor. Aparte de este consumo también existen equipos que requieren electricidad, como bombas, instrumentos, iluminación, ventiladores y elementos de control. Por este motivo, se considera de forma complementaria la posibilidad de utilizar un sistema fotovoltaico para cubrir una parte de estas cargas auxiliares, sin modificar la operación térmica de la caldera.

Tabla 62. *Carga eléctrica auxiliar.*

Carga auxiliar	Potencia (kW)	Horas mensuales	Consumo mensual (kWh)
Bomba de agua de alimentación.	15	300	4.500
Bomba de fuel oil.	7,5	250	1.875
Ventilación y aire de combustión.	18	300	5.400
Instrumentación y control.	2	720	1.440
Iluminación y servicios auxiliares.	4	300	1.200
Otros auxiliares.	12	300	3.600
Total	—	—	18.015

Nota. Elaborado por la autora.

De acuerdo con la Tabla 57, el sistema fotovoltaico puede aportar una reducción en el consumo eléctrico auxiliar, pero no reemplaza el fuel oil utilizado por la caldera para

producir vapor. Por esta razón, esta alternativa se considera un apoyo dentro de la propuesta y no la medida principal del diagnóstico energético.

Tabla 63. *Evaluación preliminar de sistema fotovoltaico auxiliar.*

Parámetro	Valor estimado
Carga eléctrica auxiliar.	18015 kWh/mes.
Potencia propuesta.	40 kWp.
Generación promedio mensual.	5.400 kWh/mes.
Generación anual.	64.800 kWh/año.
Tarifa eléctrica referencial.	0,10 USD/kWh.
Ahorro anual.	6.480 USD/año.
Inversión.	36.000 USD.
Retorno simple.	5,56 años.

Nota. Elaborado por la autora.

Plan de mantenimiento energético de equipos

El plan de mantenimiento energético se plantea para disminuir pérdidas, mantener una operación más estable y mejorar el seguimiento del sistema de generación de vapor. Las actividades propuestas consideran aspectos relacionados con combustión, purgas, aislamiento, trampas de vapor, retorno de condensado, instrumentación y control de emisiones.

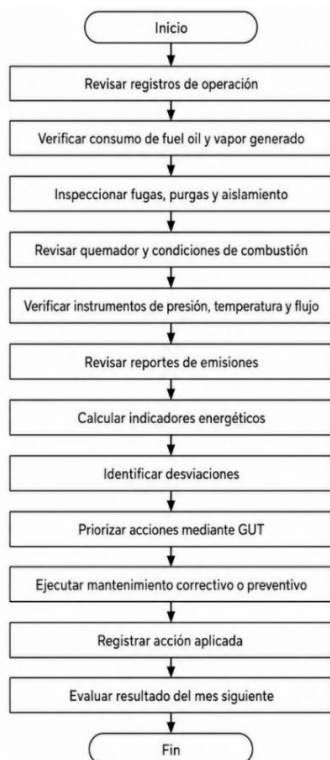
Tabla 64. *Plan de mantenimiento energético para la caldera 3.*

Actividad	Frecuencia	Responsable sugerido	Indicador asociado
Inspección de fugas de vapor.	Semanal.	Operación / Mantenimiento.	Consumo específico.
Revisión de purgas.	Semanal.	Operación.	Eficiencia térmica.
Limpieza y revisión de quemador.	Mensual.	Mantenimiento.	CO, SO ₂ , eficiencia térmica.
Verificación de presión y temperatura.	Diaria.	Operación.	Estabilidad operativa.
Revisión de aislamiento térmico.	Mensual.	Mantenimiento.	Pérdidas térmicas.
Inspección de trampas de vapor.	Mensual.	Mantenimiento.	Retorno de condensado.
Revisión de instrumentos de medición.	Mensual.	Control técnico.	Confiabilidad de registros.
Integración de emisiones con operación.	Mensual.	Ambiente / Operación.	Índice SO ₂ /límite.
Cálculo de indicadores EnPIs.	Mensual.	Control técnico.	Consumo específico, eficiencia.
Revisión del escenario MEASUR.	Trimestral.	Supervisión / Control técnico.	Ahorro energético modelado.

Nota. Elaborado por la autora.

Diagrama de flujo para mantenimiento energético

Figura 31. *Diagrama de flujo del mantenimiento energético.*



Nota. Elaborado por la autora.

La Figura 32 presenta la secuencia utilizada para organizar las actividades de mantenimiento energético. El proceso comienza con la revisión de los registros de operación, continúa con la inspección de las condiciones físicas del sistema y termina con la evaluación mensual de los indicadores. De esta manera, el mantenimiento puede revisarse también desde el comportamiento energético del equipo y no únicamente desde su disponibilidad mecánica.

Presupuesto financiero de la propuesta

El presupuesto se organizó separando las medidas de acuerdo con el nivel de inversión que requiere cada una. En el primer grupo quedaron el control documental, la línea base y los indicadores, ya que son actividades que demandan menos recursos. Luego se consideraron los trabajos de mantenimiento, aislamiento, control de purgas y recuperación de condensado. Finalmente, el economizador representa la inversión más alta de la propuesta, debido al costo que implica evaluar su aplicación e incorporarlo al sistema para aprovechar el calor residual.

Tabla 65. *Presupuesto estimado de optimización energética.*

Componente de propuesta	Inversión estimada (USD)	Ahorro anual estimado (USD)	Fuente de evaluación	Retorno simple
Acciones térmicas del sistema de vapor.	86.000	88.525	MEASUR Tool.	11,658 meses.
Sistema fotovoltaico auxiliar.	36.000	6.480	Cálculo eléctrico.	5,56 años.
Total, integrado potencial.	122.000	95.005	MEASUR + complementaria.	1,28 años.

Nota. Elaborado por la autora.

En la evaluación térmica realizada con MEASUR se obtuvo un ahorro anual estimado de 88.525 USD y un retorno simple de 11,658 meses. A este resultado se puede sumar, de manera independiente, el ahorro previsto para el sistema fotovoltaico auxiliar. Al considerar ambas medidas, el ahorro potencial llega a 95.005 USD/año. Este valor corresponde al escenario integrado de la propuesta y no únicamente a lo calculado por MEASUR Tool.

Sumatoria del retorno de inversión

Para calcular el retorno global se compara la inversión total con el ahorro anual esperado. Con una inversión de 122.000 USD y un ahorro anual de 95.005 USD, el retorno simple global obtenido es de 1,28 años.

La Tabla 60 permite observar que el retorno calculado resulta favorable desde el punto de vista financiero. Entre las acciones que requieren menor inversión y pueden generar mayor impacto se encuentran el ajuste de combustión, control de purgas, corrección de fugas, recuperación de condensado y seguimiento mensual mediante indicadores energéticos.

Tabla 66. *Sumatoria del retorno de inversión.*

Concepto	Valor
Inversión total.	122.000 USD.
Ahorro anual térmico.	88.525 USD/año.
Ahorro anual eléctrico.	6.480 USD/año.
Ahorro total anual.	95.005 USD/año.
Retorno simple global.	1,28 años.

Nota. Elaborado por la autora.

Análisis económico y sensibilidad de la propuesta

El retorno se evaluó separando las medidas térmicas, que fueron modeladas por MEASUR, de la alternativa fotovoltaica, que corresponde a cargas eléctricas auxiliares.

Esta separación evita atribuir al sistema de vapor un ahorro que pertenece a otra fuente de energía y permite tomar decisiones con el costo y el ahorro que realmente corresponden a cada intervención.

Tabla 67. *Sensibilidad económica de las acciones térmicas de optimización.*

Escenario	Inversión	Ahorro anual	ROI simple	Retorno simple
Ahorro térmico -10 % en Fuel Oil	86.000 USD	81.987 USD/año	95,33 %	12,59 meses
Ahorro térmico base MEASUR	86.000 USD	88.525 USD/año	102,94 %	11,66 meses
Ahorro térmico +10 % en Fuel Oil	86.000 USD	95.061 USD/año	110,54 %	10,86 meses
Escenario integrado con fotovoltaico	122.000 USD	95.005 USD/año	77,87 %	15,41 meses

Nota. Elaborado por la autora. La sensibilidad modifica únicamente el ahorro por Fuel Oil de las acciones térmicas; el escenario fotovoltaico se mantiene como alternativa independiente.

La inversión térmica se recupera en menos de trece meses incluso en la condición conservadora de ahorro. El escenario integrado presenta un retorno mayor porque incorpora una inversión adicional de 36.000 USD para la alternativa fotovoltaica. Por esta razón, la decisión prioritaria es ejecutar primero las acciones térmicas de MEASUR y evaluar la generación fotovoltaica como complemento de las cargas auxiliares.

Análisis comparativo de escenarios

El análisis comparativo revisa las diferencias entre la situación actual y el escenario optimizado. Para realizar esta comparación se toman en cuenta el consumo anual de fuel oil, costo anual, consumo específico, eficiencia térmica promedio, índice SO₂/límite y costo específico de vapor.

La Tabla 61 muestra que la mayor parte del ahorro se obtiene por la reducción del consumo de combustible y, en segundo lugar, por el agua de reposición. Este comportamiento se relaciona con los cambios realizados en la eficiencia de combustión, las purgas, el retorno de condensado y las pérdidas térmicas, ya que estas variables influyen en la cantidad de energía que necesita el sistema para producir vapor útil.

Tabla 68. *Análisis comparativo entre situación actual y propuesta.*

Indicador	Línea base	Escenario MEASUR	Diferencia
-----------	------------	------------------	------------

Consumo energético del sistema de vapor.	134.851,1 MMBtu/año.	129.014,1 MMBtu/año.	-5.837,0 MMBtu/año.
Costo de combustible.	1.510.332 USD/año.	1.444.958 USD/año.	-65.373 USD/año.
Costo de agua de reposición.	231.995 USD/año.	208.844 USD/año.	-23.151 USD/año.
Costo eléctrico comprado.	21.597 USD/año.	21.597 USD/año.	0 USD/año.
Costo anual total.	1.763.924 USD/año.	1.675.399 USD/año.	-88.525 USD/año.
Ahorro porcentual.	—	5,0 %	Mejora global del escenario.
Inversión térmica.	—	86.000 USD.	Retorno de 11,658 meses.

Nota. Elaborado por la autora.

3.3. Plan de optimización energética

El plan de optimización se organiza a partir de las condiciones críticas encontradas durante el diagnóstico. Para cada acción se establece el objetivo, la actividad que debe realizarse, el indicador utilizado para el seguimiento, el responsable sugerido y el nivel de prioridad.

Tabla 69. *Plan de optimización energética para la caldera 3.*

Línea de intervención	Acción principal	Indicador de control	Prioridad
Línea base e indicadores.	Crear matriz mensual y calcular EnPIs por caldera.	Consumo específico, eficiencia térmica, costo de vapor	Alta.
Control de combustión.	Revisar quemador, exceso de aire, O ₂ y temperatura de gases.	Eficiencia térmica, CO, NO _x , SO ₂ .	Alta.
Purgas y pérdidas térmicas.	Controlar purgas, fugas, aislamiento y trampas de vapor.	Consumo específico y pérdidas térmicas.	Alta.
Recuperación de condensado.	Revisar líneas de condensado y puntos de recuperación.	Retorno de condensado.	Media.
Seguimiento ambiental.	Relacionar emisiones con fuel oil, vapor, combustión y mantenimiento.	Índice SO ₂ /límite.	Alta.
Evaluación económica y software.	Actualizar costo específico y escenario MEASUR trimestralmente.	USD/t vapor, USD/año, ahorro MEASUR.	Media.
Carga eléctrica auxiliar.	Evaluar sistema fotovoltaico auxiliar por separado.	kWh/mes.	Baja-complementaria.

Nota. Elaborado por la autora.

Modalidad de implementación y control de resultados

La propuesta se programó según la condición operativa de cada acción. Las actividades de seguimiento y verificación pueden ejecutarse durante la operación; las intervenciones físicas se realizan por sectores o en una parada planificada, según el nivel

de riesgo y el permiso de trabajo requerido. La tabla siguiente convierte las oportunidades de optimización en una secuencia operativa concreta.

Tabla 70. *Modalidad de implementación de las acciones energética.*

Intervención	Modalidad	Actividad aplicada	Criterio de aceptación
Línea base, emisiones y KPI	Operación continua	Consolidar Fuel Oil, vapor, presión, temperatura, emisiones y costo cada mes.	Indicadores calculados y reporte mensual disponible.
Ajuste de combustión	Operación con carga controlada	Revisar quemador, lanzas, O ₂ , exceso de aire, CO, NO _x y SO ₂ .	Eficiencia objetivo del escenario sin exceder límites de emisiones.
Purgas	Operación continua	Ajustar la tasa desde 3 % a 2 % conforme a control de calidad de agua.	Pérdida reducida sin afectar la calidad del vapor.
Trampas, fugas y aislamiento	Aislamiento local por sectores	Inspeccionar y corregir trampas, válvulas, uniones y superficies calientes.	Reducción de pérdidas y mejora del retorno de condensado.
Economizador y automatización mayor	Parada programada	Realizar ingeniería, seguridad de proceso e instalación durante mantenimiento.	Prueba de estanqueidad, control y desempeño posterior.

Nota. Elaborado por la autora. La tabla define la condición de ejecución requerida; no sustituye los permisos de operación y mantenimiento de la Refinería.

Tabla 71. *Cuadro de mando para conservar la mejora energética de la caldera 3.*

Indicador	Línea base o meta	Frecuencia	Acción ante desviación
Eficiencia térmica	83,95 % base; 87,05 % escenario	Mensual	Revisar combustible, quemador, purga y pérdidas.
Consumo específico	17,76 gal/t base	Mensual	Comparar con producción de vapor y horas de operación.
Retorno de condensado	39,83 % base; meta 45 %	Mensual	Inspeccionar trampas, retornos y puntos de recuperación.
Purgas	3 % base; 2 % escenario	Semanal	Verificar conductividad y ajustar el programa de purga.
SO ₂ /límite	Índice actual hasta 1,18; meta ≤ 1,00	Mensual y por monitoreo	Revisar azufre del Fuel Oil y condición de combustión.
Azufre del Fuel Oil	1,59 % observado; criterio máximo 1 %	Por lote	Retener o gestionar mezcla antes del consumo.
O ₂ , exceso de aire y temperatura de gases	Lectura del ajuste de quemador	Por ajuste y mensual	Corregir relación aire-combustible y registrar el resultado.

Nota. Elaborado por la autora. El cuadro de mando se integra al plan de mantenimiento energético y a la revisión mensual del escenario MEASUR.

El cuadro de mando evita que la propuesta termine como una simulación puntual. Cada indicador se relaciona con una decisión operativa: el Fuel Oil y el azufre se controlan en recepción, el SO₂ se revisa con el monitoreo ambiental, y la eficiencia, el condensado y las purgas se revisan en la operación mensual de la caldera.

3.4. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en el diagnóstico muestran que la eficiencia energética de la caldera 3 no puede revisarse tomando cada dato por separado, sino considerando el comportamiento general del sistema de generación de vapor. En este análisis intervienen el consumo de fuel oil, la producción de vapor, presión, temperatura, retorno de condensado, emisiones, costos y mantenimiento, ya que el desempeño energético está relacionado con la forma en que estas variables se presentan durante la operación.

La validación realizada al instrumento y el resultado del alfa de Cronbach mostraron que la encuesta tiene una confiabilidad adecuada para ser utilizada como complemento del diagnóstico. La información obtenida mediante la percepción del personal ayudó a revisar aspectos propios de la operación, principalmente el manejo de registros, control del consumo, mantenimiento, pérdidas visibles y la aceptación de las acciones planteadas dentro del plan de optimización energética.

En el análisis estadístico se obtuvo una relación positiva muy fuerte entre el sistema de generación de vapor y la eficiencia energética. El coeficiente de Pearson alcanzó un valor de 0,812, mostrando que las mejores condiciones de registro, control, mantenimiento y seguimiento de la operación se encuentran asociadas con una mejor gestión de la eficiencia energética. Como la investigación tiene un alcance descriptivo-correlacional, este resultado representa una asociación estadística entre las variables y no establece una relación de causa y efecto.

Al revisar las emisiones de la caldera 3, el SO_2 fue el parámetro que presentó la condición de mayor interés técnico. En enero y febrero de 2026 los promedios registrados estuvieron por encima del límite de referencia y en otros meses se encontraron valores próximos a este límite. Estos resultados hacen necesario revisar las emisiones junto con otros aspectos del equipo, entre ellos la calidad del fuel oil, la combustión, el mantenimiento, las condiciones de operación y los indicadores energéticos.

Tomando los datos de junio 2025 – mayo 2026, el consumo específico promedio de la caldera fue de 17,76 gal/t de vapor y la eficiencia térmica promedio fue de 83,95 %. Al ver los resultados de cada mes, enero y febrero de 2026 fueron los que presentaron menor desempeño. En cambio, abril y mayo de 2026 tuvieron mejores resultados. Esta comparación mensual permite tener una referencia de cómo fue trabajando la caldera durante el periodo y reconocer los meses que necesitan revisarse con mayor detalle.

El uso de MEASUR Tool permitió complementar los cálculos realizados en tablas con una evaluación computacional del sistema de vapor. Mediante el software se modelaron la línea base y el escenario optimizado, obteniéndose una reducción del consumo energético de 134.851,1 MMBtu/año a 129.014,1 MMBtu/año, lo que representa un ahorro de 5,0 %. De igual manera, el costo anual total pasó de 1.763.924 USD/año a 1.675.399 USD/año. La diferencia entre ambos escenarios representa 88.525 USD de ahorro por año y, para las acciones térmicas evaluadas, el retorno simple obtenido fue de 11,658 meses.

A partir de los resultados se plantearon acciones dirigidas principalmente a mejorar la medición, el control y algunos aspectos de la operación. Dentro de estas acciones se consideraron el seguimiento de la línea base y los indicadores, ajustes en la combustión, revisión de purgas, recuperación de condensado, aislamiento térmico y la evaluación de un economizador. Todas estas medidas se relacionan con el comportamiento del consumo energético dentro del sistema de vapor. El sistema fotovoltaico se mantiene como una alternativa complementaria destinada a las cargas eléctricas auxiliares y, por esta razón, no se considera como un resultado directo obtenido mediante el módulo Steam Assessment.

Viabilidad económica y ambiental de las medidas propuestas

La viabilidad se evaluó de manera conjunta. El escenario MEASUR reduce el consumo energético del sistema de vapor en 5.837,0 MMBtu/año, equivalente a 5,0 % frente a la línea base, y genera un ahorro anual de 88.525 USD para una inversión térmica de 86.000 USD. Estos resultados muestran viabilidad económica; sin embargo, la condición ambiental se verifica con un criterio adicional, porque reducir Fuel Oil no garantiza por sí solo que el SO₂ cumpla el límite de concentración.

Tabla 72. *Criterios de viabilidad económica y ambiental de la propuesta.*

Resultado	Base de cálculo	Interpretación y verificación
Ahorro energético	5.837,0 MMBtu/año; 5,0 % en MEASUR.	Reduce el requerimiento energético para producir la misma demanda de vapor.
Ahorro económico	88.525 USD/año; retorno térmico de 11,66 meses.	Justifica priorizar las acciones térmicas antes de la alternativa fotovoltaica.
Reducción de masa emitida	Aproximadamente proporcional a 5,0 % si se mantiene la misma calidad de Fuel Oil y carga.	Se verifica con Fuel Oil consumido y el inventario anual de emisiones.

Resultado	Base de cálculo	Interpretación y verificación
Cumplimiento de SO ₂	Índice consolidado de 1,08; enero y febrero con 1,18.	Requiere Fuel Oil con azufre controlado y ajuste de combustión; se verifica en el monitoreo de fuente fija.

Nota. Elaborado por la autora a partir de los resultados de MEASUR Tool, los informes mensuales de emisiones y el acta de acciones correctivas.

La disminución del consumo de Fuel Oil puede reducir la masa anual de contaminantes asociada al combustible cuando se mantiene la misma calidad de Fuel Oil y el mismo nivel de carga. El cumplimiento de SO₂, en cambio, depende de la concentración medida en chimenea y exige controlar el azufre del combustible. Esta distinción evita presentar una reducción energética como si fuera, por sí sola, una evidencia de cumplimiento ambiental.

CONCLUSIONES

La revisión sistemática permitió reunir información relacionada con la eficiencia energética en sistemas industriales de generación de vapor. En los estudios seleccionados se revisaron aspectos como diagnóstico energético, línea base, indicadores EnPIs, combustión, pérdidas térmicas, recuperación de calor y evaluación técnico-económica. A partir de estos trabajos se pudo establecer que el análisis de la caldera 3 no debe realizarse de manera aislada, sino considerando también las condiciones del sistema donde opera, entre ellas el consumo de fuel oil, la producción de vapor, el retorno de condensado, las emisiones, el mantenimiento y los costos operativos.

En el desarrollo del estudio se dio mayor importancia a los datos cuantitativos obtenidos de la caldera 3, sin intervenir directamente en su funcionamiento. La investigación también mantuvo un alcance descriptivo-correlacional. Para reunir y revisar la información se utilizaron registros disponibles, observación técnica y una encuesta estructurada, junto con la línea base energética, los indicadores, la matriz GUT y MEASUR Tool. Esto permitió trabajar los resultados de operación de la caldera y, al mismo tiempo, revisar la información ambiental y económica disponible. La validación del instrumento alcanzó 96,68 % y la confiabilidad obtuvo un alfa de Cronbach de 0,846, por lo que la encuesta pudo utilizarse como apoyo para complementar los resultados del diagnóstico.

Los resultados del diagnóstico y de la propuesta de optimización muestran que la caldera 3 registró un consumo anual de 813.200 galones de fuel oil y una producción de 45.790 toneladas de vapor durante el periodo junio 2025 – mayo 2026. El consumo específico promedio fue de 17,76 gal/t y la eficiencia térmica promedio alcanzó 83,95 %.

Al revisar la parte ambiental, el SO₂ fue el parámetro que presentó mayor atención frente al límite empleado en los informes de monitoreo, sobre todo en enero y febrero de 2026. Por medio de MEASUR Tool se obtuvo para las acciones térmicas un ahorro anual estimado de 88.525 USD y un retorno simple de 11,658 meses. Cuando a este resultado se suma la alternativa fotovoltaica destinada a las cargas auxiliares, el ahorro potencial llega a 95.005 USD/año y el retorno simple global resulta en 1,28 años.

El balance térmico anual confirmó que 128.729,56 GJ/año de energía del Fuel Oil produjeron 108.064,40 GJ/año de energía útil en el vapor, con una eficiencia de 83,95 %. El análisis exergético global complementó esta lectura: el rendimiento exergético fue 28,60 %, por lo que la principal oportunidad no es aumentar la demanda de vapor, sino reducir irreversibilidades y pérdidas mediante combustión controlada, purgas, retorno de condensado y aislamiento.

La verificación de diciembre de 2025 a marzo de 2026 evidenció que el SO₂ es la condición ambiental crítica de la caldera 3: 11 de 15 mediciones superaron 2.004 mg/Nm³ y el promedio consolidado fue 2.155,47 mg/Nm³. El contenido de azufre de 1,59 % en peso y la recomendación de emplear Fuel Oil con máximo 1 % explican por qué el control de combustible debe acompañar el ajuste de combustión.

RECOMENDACIONES

Se recomienda llevar una matriz mensual para dar seguimiento energético a la caldera 3, donde se registren de manera conjunta el consumo de fuel oil, producción de vapor, presión, temperatura, horas de operación, retorno de condensado, emisiones, costos y mantenimiento. Con esta herramienta se puede mantener actualizada la línea base energética y reconocer con mayor facilidad los cambios que se presenten en el desempeño del equipo.

Se recomienda obtener mensualmente los indicadores de desempeño energético de la caldera 3, entre ellos el consumo específico de fuel oil, vaporización específica, eficiencia térmica, índice SO₂/límite, costo específico de vapor y retorno de condensado. Al tener estos resultados mes a mes se puede comparar el funcionamiento de la caldera y detectar con mayor facilidad dónde se presentan cambios que deban revisarse.

Se recomienda actualizar el modelo de MEASUR Tool conforme se vaya generando nueva información del sistema de vapor. Para ello pueden incorporarse los registros más recientes de consumo, presión, producción de vapor, retorno de

condensado, purgas, costos y pérdidas térmicas. Así se podrá observar cómo cambia el sistema respecto a la línea base y comparar los resultados con las mejoras que se estén evaluando.

Se recomienda comprobar durante la operación varios puntos relacionados con la combustión y el mantenimiento de la caldera. Entre ellos están el quemador, exceso de aire, temperatura de gases, purgas, fugas, aislamiento térmico, trampas de vapor e instrumentos de medición. Revisar estos elementos permite reconocer dónde aparecen pérdidas durante el funcionamiento y observar también el comportamiento de las emisiones del equipo.

Se recomienda establecer un criterio de recepción para el Fuel Oil que exija certificado de PCI y contenido de azufre por lote. Cuando el azufre sea superior a 1 % en peso, la condición debe gestionarse antes del consumo mediante las acciones que autorice la Refinería. El resultado se debe relacionar con el índice SO₂/límite y con la revisión del quemador, evitando tratar el exceso de emisiones como un problema aislado del combustible.

Se recomienda ejecutar el plan por etapas: primero consolidar la línea base y el tablero de indicadores; después ajustar combustión, purgas y retorno de condensado con operación controlada; finalmente programar las intervenciones de aislamiento, trampas, automatización o economizador que requieran aislamiento local o parada. Cada etapa debe cerrar con la comparación de eficiencia, consumo específico, retorno de condensado y SO₂/límite frente a su línea base.

Se recomienda incluir dentro de las alternativas a revisar la instalación de un economizador y el uso de un sistema fotovoltaico auxiliar, evaluando cada opción según las condiciones reales de la Planta Generación. En el caso del economizador, se aprovecharía parte del calor que todavía contienen los gases de salida. El sistema fotovoltaico, por su parte, permitiría reducir parte del consumo eléctrico auxiliar de bombas, ventilación, instrumentación e iluminación.

Se recomienda que en futuros estudios también se incluyan otras calderas de la Refinería La Libertad, de manera que sea posible comparar el desempeño energético entre los equipos y definir indicadores para cada unidad de generación. Con una evaluación más amplia se podría mejorar la gestión energética de la Planta Generación y tener un mayor control técnico sobre el funcionamiento general del sistema de vapor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abuelnuor, A A A, Hassan Suliman, M. M., Abuelnour, M. A., Younis, O. & Mohamed, E. F. (2024). Exergy analysis of the boiler in phase 3 of the Khartoum North power plant. *Results in Engineering*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101919>
- Abuelnuor, Abuelnuor A A, Hassan Suliman, M. M., Abuelnour, M. A., Younis, O. & Mohamed, E. F. (2024). Exergy analysis of the boiler in phase 3 of the Khartoum North power plant. *Results in Engineering*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101919>
- Alhashem, A, Almutairi, A. S. & Almokmesh, S. F. (2025). Flue Gas Recirculation in Steam Boilers: A Comprehensive Assessment Strategy for Energy Optimization and Efficiency Enhancement. *Processes*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/pr13020395>
- Alhashem, Abdulwahab, Almutairi, A. S. & Almokmesh, S. F. (2025). Flue Gas Recirculation in Steam Boilers: A Comprehensive Assessment Strategy for Energy Optimization and Efficiency Enhancement. *Processes*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/pr13020395>
- Balón Yagual, C. E. (2017). *Elaboración de un estudio técnico para la implementación de nuevas calderas en la planta Cautivo, de la Refinería La Libertad - provincia de Santa Elena* [Universidad Estatal Península de Santa Elena]. <http://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/3979>
- Batouta, K. I., Aouhassi, S. & Mansouri, K. (2025). Green Industry: Energy Efficiency Improvement of Steam Generation in a Moroccan Plastic Recycling Industry. *Advances in Systems Science and Applications*, 2025(1), 30–43. <https://doi.org/10.25728/assa.2025.2025.1.1657>
- Behzadi, A. & Abbasian Arani, A. A. (2025). Modification of the flow pattern in ducts outlet and economizer chamber for optimization of existing high pressure boilers to improve boiler performance. *International Journal of Thermofluids*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101310>
- Carvajal, F., Gil, M. & Poveda Bonilla, R. (2025). *Eficiencia energética en la transición sostenible e inclusiva de América Latina y el Caribe: progresos y políticas* (Serie Recursos Naturales y Desarrollo, Número 228). <https://hdl.handle.net/11362/82445>
- Castillo Vivar, J. A. & Salgado Erazo, C. A. (2025). *Estudio de eficiencia energética de los sistemas de generación de vapor de alta y generación eléctrica de la Refinería*

Esmeraldas [Universidad Central del Ecuador].
<https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/4ca282ef-9041-429c-b8d9-27e6e41cbc35>

Chamorro, M. V., Avella, J. C., Barrios, F. G., Ávila, A. M. & Marriaga, M. P. (2024). OPERATIONAL CONTROL OF THE ENERGY PERFORMANCE OF A WATER-TUBE BOILER USING INTELLIGENT MONITORING OF OPERATING VARIABLES AND PARAMETERS. *EUREKA, Physics and Engineering*, 2024(3), 45–60. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003222>

Chamorro, M. V, Avella, J. C., Barrios, F. G., Ávila, A. M. & Marriaga, M. P. (2024). Operational Control of the Energy Performance of a Water-Tube Boiler Using Intelligent Monitoring of Operating Variables and Parameters. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2024(3), 45–60. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003222>

Chantasiriwan, S. (2023). Economic feasibility of retrofitting blowdown heat recovery system using steam dryer to lignite-fired power plant for reduced fuel consumption. *Thermal Science and Engineering Progress*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102208>

Corbita, J N, Pabilona, L. & Villanueva, E. (2024). Energy Audit on Two 22-TPH Coal-fired Boilers of a Pineapple Processing Plant. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 32(4), 1919–1937. <https://doi.org/10.47836/pjst.32.4.25>

Corbita, Jay Nelson, Pabilona, L. & Villanueva, E. (2024). Energy Audit on Two 22-TPH Coal-fired Boilers of a Pineapple Processing Plant. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 32(4), 1919–1937. <https://doi.org/10.47836/pjst.32.4.25>

Demirel, Y E, Simsek, E., Ozturk, E. & Kitis, M. (2021). Selection of priority energy efficiency practices for industrial steam boilers by PROMETHEE decision model. *Energy Efficiency*, 14(8). <https://doi.org/10.1007/s12053-021-10007-8>

Demirel, Yunus Emre, Simsek, E., Ozturk, E. & Kitis, M. (2021). Selection of priority energy efficiency practices for industrial steam boilers by PROMETHEE decision model. *Energy Efficiency*, 14(8). <https://doi.org/10.1007/s12053-021-10007-8>

EP Petroecuador. (2026). *Informes mensuales de monitoreo de gases de fuentes fijas de combustión de la Planta Generación de la Refinería La Libertad*.

Fasogbon, S. K., Fetuga, I. A., Oyeniran, A. T., Alelume, M., Onafowokan, J. T., Eso, O. S., Ndokwu, T. A., Afolabi, S. O., Bassey, V. B., Oluwadare, S. R. & Olakoyejo, O. T. (2026). Heat transfer performance analysis of steam boilers-fin and tube heat exchangers

- under varying geometric dimensions. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 17(2), 94–108. <https://doi.org/10.1504/IJESMS.2026.152044>
- Gao, W, Zuo, X., Liu, X., Yan, L., Pang, J., Qiao, W., Xu, X., Liang, Y. & Bu, Y. (2024). Energy Efficiency Analysis and Energy-Saving Measures for the Steam System in a Cigarette Factory in Zhangjiakou. *International Journal of Heat and Technology*, 42(4), 1173–1184. <https://doi.org/10.18280/ijht.420407>
- Gao, Wei, Zuo, X., Liu, X., Yan, L., Pang, J., Qiao, W., Xu, X., Liang, Y. & Bu, Y. (2024). Energy Efficiency Analysis and Energy-Saving Measures for the Steam System in a Cigarette Factory in Zhangjiakou. *International Journal of Heat and Technology*, 42(4), 1173–1184. <https://doi.org/10.18280/ijht.420407>
- Gavirineni, N. K. & Gundabattini, E. (2022). Investigation of the Performance of a 660-MW Supercritical Boiler in Terms of NO_x Emission and Enhancing the Thermal Efficiency by Optimizing the Air Distribution System. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 103(5), 1155–1168. <https://doi.org/10.1007/s40032-022-00833-9>
- Ibn Batouta, K., Aouhassi, S. & Mansouri, K. (2024). Energy saving potential in steam systems: A techno-economic analysis of a recycling pulp and paper mill industry in Morocco. *Scientific African*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02375>
- International Energy Agency. (2025). *Energy Efficiency 2025: Industry*. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025/industry>
- International Organization for Standardization. (2023). *ISO 50006:2023 Energy management systems – Evaluating energy performance using energy performance indicators and energy baselines*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/79367.html>
- International Organization for Standardization. (2025). *ISO 50002-1:2025 Energy audits – Part 1: General requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/83645.html>
- Kocabaş, C & Savaş, A. F. (2021). Reducing Energy Losses of Steam Boilers Caused by Blowdown with Using the FMEA Method. *Smart Science*, 9(2), 70–79. <https://doi.org/10.1080/23080477.2021.1898794>
- Kocabaş, Ceyda & Savaş, A. F. (2021). Reducing Energy Losses of Steam Boilers Caused by Blowdown with Using the FMEA Method. *Smart Science*, 9(2), 70–79. <https://doi.org/10.1080/23080477.2021.1898794>

- Liao, W., Zhang, X. & Li, Z. (2022). Experimental investigation on the performance of a boiler system with flue gas dehumidification and combustion air humidification. *Applied Energy*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119623>
- Men, Y., Liu, X. & Zhang, T. (2022). Performance research and application of the vapor pump boiler equipped with flue gas recirculation system. *Energy Conversion and Management*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115201>
- Ministerio de Energía y Minas. (2024). *Balance Energético Nacional 2023*. <https://www.geoenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/08/Balance-Energetico-Nacional-2023.pdf>
- Mo, Q., Ye, H., Lin, X., Li, G., Chen, W. & Lu, W. (2022). Energy analysis and energy efficiency improvement strategies of bagasse boiler based on test data. *Huagong Jinzhan/Chemical Industry and Engineering Progress*, 41(6), 3350–3359. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2021-1586>
- Mo, Qianci, Ye, H., Lin, X., Li, G., Chen, W. & Lu, W. (2022). Energy analysis and energy efficiency improvement strategies of bagasse boiler based on test data. *Huagong Jinzhan/Chemical Industry and Engineering Progress*, 41(6), 3350–3359. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2021-1586>
- Niemeyer, E., Walker, M. E., Lema, G. & Masanet, E. (2023). Impact of water consumption on the economic viability of energy efficiency improvements for industrial steam systems. *Energy Efficiency*, 16(8). <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10167-9>
- Niemeyer, Eric, Walker, M. E., Lema, G. & Masanet, E. (2023). Impact of water consumption on the economic viability of energy efficiency improvements for industrial steam systems. *Energy Efficiency*, 16(8). <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10167-9>
- Ramos-Galarza, C. A. (2020). Los alcances de una investigación. *CienciAmérica*, 9(3), 1–6. <https://doi.org/10.33210/ca.v9i3.336>
- Rastegarpour, S., Mariotti, A., Ferrarini, L. & Aminyavari, M. (2023). Energy efficiency improvement for industrial boilers through a flue-gas condensing heat recovery system with nonlinear MPC approach. *Applied Thermal Engineering*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120554>
- Rastegarpour, Soroush, Mariotti, A., Ferrarini, L. & Aminyavari, M. (2023). Energy efficiency improvement for industrial boilers through a flue-gas condensing heat recovery system with nonlinear MPC approach. *Applied Thermal Engineering*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120554>

- Saari, J, Sermyagina, E., Kaikko, J., Haider, M., Hamaguchi, M. & Vakkilainen, E. (2021). Evaluation of the energy efficiency improvement potential through back-end heat recovery in the kraft recovery boiler. *Energies*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/en14061550>
- Saari, Jussi, Sermyagina, E., Kaikko, J., Haider, M., Hamaguchi, M. & Vakkilainen, E. (2021). Evaluation of the energy efficiency improvement potential through back-end heat recovery in the kraft recovery boiler. *Energies*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/en14061550>
- Saha, S., Sayem, N. A., Khan, M. M. A. & Biswas, P. K. (2021a). Overall performance of steam system used in garment industries in Bangladesh: a case study-based approach. *Energy Efficiency*, 14(2). <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09929-0>
- Saha, S., Sayem, N. A., Khan, M. M. A. & Biswas, P. K. (2021b). Overall performance of steam system used in garment industries in Bangladesh: a case study-based approach. *Energy Efficiency*, 14(2). <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09929-0>
- Shamsaei, Y., Amidpour, M., Ozgoli, H. A., Hajiseyed Mirzahosseini, A. & Sotudeh, A. F. (2023). Performance analysis of power plant designed with a carbon capture unit: study of an oil refinery. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(3), 2771–2780. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04707-6>
- Terhan, M, Özağdaş, E. & Omar, M. A. (2023). Energy and economic assessments of waste heat recovery by designs of economizer, condensing economizer and air preheater. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(4), 2521–2536. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1112011>
- Terhan, Meryem, Özağdaş, E. & Omar, M. A. (2023). Energy and economic assessments of waste heat recovery by designs of economizer, condensing economizer and air preheater; [Ekonomizer, yoğunlaşmalı ekonomizer ve hava ön ısıtıcı tasarımları ile atık ısı geri kazanımının enerji ve ekonomik değerlendirilmesi]. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(4), 2521–2536. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1112011>
- U.S. Department of Energy. (2026). *MEASUR*. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://www.energy.gov/cmei/ito/measur>

Wang, Y, Li, Z. & Zhang, N. (2024). A Hybrid Soft Sensor Model for Measuring the Oxygen Content in Boiler Flue Gas. *Sensors*, 24(7).
<https://doi.org/10.3390/s24072340>

Wang, Yonggang, Li, Z. & Zhang, N. (2024). A Hybrid Soft Sensor Model for Measuring the Oxygen Content in Boiler Flue Gas. *Sensors*, 24(7).
<https://doi.org/10.3390/s24072340>

ANEXOS

Anexo A. Operacionalización de variables de estudio – variable dependiente.

Variable Independiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Preguntas	Escala de medición
Sistema de generación de vapor	Conjunto de equipos, redes, accesorios, instrumentos y condiciones operativas que permiten transformar la energía del combustible en vapor útil para los procesos industriales.	Se analiza mediante las condiciones de operación de las calderas, el sistema de combustión, el agua de alimentación, el retorno de condensado, la distribución de vapor, la instrumentación y el mantenimiento operativo.	Dimensión 1. Registro operativo del sistema: comprende la disponibilidad de información sobre consumo, operación y funcionamiento de las calderas.	Indicador 1. Registro de consumo de combustible.	➤ En la Planta Generación se registran de forma ordenada los consumos de combustible utilizados en las calderas.	Ordinal (Likert 1-5)
				Indicador 2. Registro por equipo generador de vapor.	➤ Los registros disponibles permiten conocer el consumo de combustible por cada caldera.	
			Dimensión 2. Demanda y uso del vapor: se refiere a la identificación de los procesos que utilizan vapor y su comportamiento operativo.	Indicador 3. Identificación de áreas de mayor demanda de vapor.	➤ Se identifican claramente las áreas o procesos que requieren mayor demanda de vapor.	
				Indicador 4. Conocimiento operativo del uso de vapor.	➤ El personal operativo conoce cuáles son los principales usos del vapor dentro de la planta.	
			Dimensión 3. Control del consumo operativo: comprende el seguimiento de las variaciones de combustible frente a la demanda de vapor.	Indicador 5. Análisis de variaciones de consumo.	➤ Se analizan las variaciones de consumo de combustible cuando cambia la demanda de vapor.	
				Indicador 6. Detección de consumos anormales.	➤ Se revisan los registros operativos para detectar consumos anormales de combustible.	
			Dimensión 4. Procedimientos de operación: comprende la existencia y aplicación de instrucciones operativas para el sistema de generación de vapor.	Indicador 7. Existencia de procedimientos operativos.	➤ Existen procedimientos claros para operar el sistema de generación de vapor.	
				Indicador 8. Aplicación de procedimientos para evitar desperdicios.	➤ Los procedimientos de operación ayudan a evitar desperdicios de vapor o combustible.	
			Dimensión 5. Comunicación y reporte operativo: se refiere al registro y atención de novedades relacionadas con el funcionamiento del sistema.	Indicador 9. Registro de novedades operativas.	➤ Las novedades relacionadas con presión, vapor, combustible o fallas se registran durante la operación.	
				Indicador 10. Uso de reportes para mejora operativa.	➤ Las novedades reportadas por los operadores son tomadas en cuenta para mejorar la operación del sistema.	

Nota. Elaborado por la autora.

Anexo B. Operacionalización de variables de estudio – variable independiente.

Variable Dependiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Preguntas	Técnica e Instrumento
Eficiencia energética	Relación entre la energía útil obtenida y la energía suministrada al sistema, considerando el uso eficiente del combustible y la reducción de pérdidas energéticas.	Se evalúa mediante el desempeño térmico, consumo de combustible, pérdidas energéticas, calidad de combustión e indicadores de desempeño energético asociados al sistema de generación de vapor.	Dimensión 1. Identificación de oportunidades de mejora: comprende el reconocimiento y priorización de acciones que puedan mejorar el desempeño energético.	Indicador 1. Identificación de oportunidades energéticas.	➤ La empresa identifica oportunidades de mejora relacionadas con el uso de vapor y combustible.	Ordinal (Likert 1-5)
				Indicador 2. Priorización de oportunidades de mejora.	➤ Las oportunidades de mejora energética se priorizan según su importancia para la operación.	
			Dimensión 2. Evaluación económica y operativa: se refiere a la consideración de costos y viabilidad de las acciones de mejora energética.	Indicador 3. Consideración de costos de combustible.	➤ Se consideran los costos de combustible al momento de analizar mejoras en el sistema de generación de vapor.	
				Indicador 4. Viabilidad de mejoras energéticas.	➤ Se evalúa si las mejoras propuestas son viables para aplicarse en la operación del sistema.	
			Dimensión 3. Control de pérdidas energéticas: comprende la reducción de pérdidas asociadas a mantenimiento, fugas, calor y fallas visibles.	Indicador 5. Mantenimiento para reducción de pérdidas.	➤ El mantenimiento de calderas, líneas de vapor y equipos relacionados ayuda a reducir pérdidas de energía.	
				Indicador 6. Reporte de fugas y pérdidas visibles.	➤ Las fugas de vapor, pérdidas de calor o fallas visibles son reportadas cuando se presentan.	
			Dimensión 4. Monitoreo del desempeño energético: se refiere al uso de instrumentos y seguimiento de resultados para controlar el comportamiento energético del sistema.	Indicador 7. Control mediante instrumentos de medición.	➤ Los instrumentos de medición disponibles permiten controlar adecuadamente la operación del sistema.	
				Indicador 8. Seguimiento de mejoras o correcciones.	➤ Se realiza seguimiento a los resultados obtenidos después de aplicar mejoras o correcciones operativas.	
			Dimensión 5. Plan de optimización energética: comprende la participación del personal y la utilidad de un plan para mejorar el uso del vapor y combustible.	Indicador 9. Aporte del personal operativo.	➤ El personal operativo puede aportar información útil para identificar problemas de eficiencia energética.	
				Indicador 10. Utilidad del plan de optimización energética.	➤ Un plan de optimización energética ayudaría a mejorar el uso del combustible y del vapor en la Planta Generación.	

Nota. Elaborado por la autora.

Anexo C. Validación por expertos.



Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Ingeniería Industrial

VALIDACIÓN POR EXPERTOS

Opinión: Yo, _____, con C.I. _____, requerido por los estudiantes de ingeniería industrial, Lainez Apolinario Ronald Wladimir, con C.I. 2450355074 y Chiriguaya Intrigo John Jaime con C.I. 2450730854, para evaluar la pertinencia de las preguntas contenidas en una guía de entrevista enfocada en los ejes temáticos de **automatización, funcionamiento, requerimientos técnicos, sostenibilidad y eficiencia energética**, con el objetivo de identificar los requerimientos del cliente y validar técnicamente las necesidades para la implementación del sistema automatizado en el prototipo de termo-compresión.

Firma: _____

TEMA: SISTEMA DE CONTROL AUTOMATIZADO DEL PROTOTIPO DE TERMO COMPRESIÓN PARA FABRICAR PANELES PLÁSTICOS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL, SANTA ELENA, ECUADOR.

N°	Preguntas	Respuesta del experto
1	¿Considera necesario el monitoreo de variables críticas (como temperatura y posición) en el proceso de termo-compresión para garantizar la calidad del producto final?	
2	¿Cree usted que es indispensable utilizar una unidad central de control industrial (como un PLC) para el funcionamiento eficiente y seguro de esta máquina?	
3	¿Considera importante que la máquina automatizada cuente con un sistema de monitoreo que registre el número de placas producidas y el seguimiento de cada etapa del proceso?	
4	¿Considera necesario optimizar el sistema de movimiento transversal de la máquina en términos de precisión y fiabilidad para asegurar una operación automatizada eficiente?	
5	¿Considera usted necesario la incorporación de un mecanismo de entrada automatizado del molde al horno, como parte del proceso productivo?	
6	¿Cómo calificaría la implementación de un sistema de transporte motorizado para trasladar automáticamente el molde entre las diferentes estaciones del proceso?	
7	¿Cree que automatizar la etapa de prensado de los moldes, mediante el uso de una gata electrohidráulica, es adecuado para mejorar la fuerza aplicada y la eficiencia del proceso? (5 Toneladas)	
8	¿Considera necesario diseñar un sistema que permita una transición fluida y precisa mediante rodachines entre las etapas del horno, la prensa y la separación final del molde?	
9	¿Opina que el diseño estructural en acero galvanizado proporciona la resistencia y durabilidad necesarias para un sistema industrial de este tipo?	
10	¿Considera que este sistema automatizado puede ser replicado o escalado fácilmente en entornos industriales o académicos, con mínimas adaptaciones?	

1	Inaceptable	I
2	Deficiente	D
3	Regular	R
4	Aceptable	A
5	Eficiente	E

Identificación	
Especialidad/área	
Años experiencia	
Teléfono	
Correo	



Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Ingeniería Industrial

VALIDACIÓN POR EXPERTOS

Opinión: Yo, _____, con C.I. _____, requerido por los estudiantes de ingeniería industrial, Lainez Apolinario Ronald Wladimir, con C.I. 2450355074 y Chiriguaya Intrigo John Jaime con C.I. 2450730854, para evaluar la pertinencia de las preguntas contenidas en una guía de entrevista enfocada en los ejes temáticos de **automatización, funcionamiento, requerimientos técnicos, sostenibilidad y eficiencia energética**, con el objetivo de identificar los requerimientos del cliente y validar técnicamente las necesidades para la implementación del sistema automatizado en el prototipo de termo-compresión.

Firma: _____

TEMA: SISTEMA DE CONTROL AUTOMATIZADO DEL PROTOTIPO DE TERMO COMPRESIÓN PARA FABRICAR PANELES PLÁSTICOS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL, SANTA ELENA, ECUADOR.

N°	Preguntas	Respuesta del experto
1	¿Considera necesario el monitoreo de variables críticas (como temperatura y posición) en el proceso de termo-compresión para garantizar la calidad del producto final?	
2	¿Cree usted que es indispensable utilizar una unidad central de control industrial (como un PLC) para el funcionamiento eficiente y seguro de esta máquina?	
3	¿Considera importante que la máquina automatizada cuente con un sistema de monitoreo que registre el número de placas producidas y el seguimiento de cada etapa del proceso?	
4	¿Considera necesario optimizar el sistema de movimiento transversal de la máquina en términos de precisión y fiabilidad para asegurar una operación automatizada eficiente?	
5	¿Considera usted necesario la incorporación de un mecanismo de entrada automatizado del molde al horno, como parte del proceso productivo?	
6	¿Cómo calificaría la implementación de un sistema de transporte motorizado para trasladar automáticamente el molde entre las diferentes estaciones del proceso?	
7	¿Cree que automatizar la etapa de prensado de los moldes, mediante el uso de una gata electrohidráulica, es adecuado para mejorar la fuerza aplicada y la eficiencia del proceso? (5 Toneladas)	
8	¿Considera necesario diseñar un sistema que permita una transición fluida y precisa mediante rodachines entre las etapas del horno, la prensa y la separación final del molde?	
9	¿Opina que el diseño estructural en acero galvanizado proporciona la resistencia y durabilidad necesarias para un sistema industrial de este tipo?	
10	¿Considera que este sistema automatizado puede ser replicado o escalado fácilmente en entornos industriales o académicos, con mínimas adaptaciones?	

1	Inaceptable	I
2	Deficiente	D
3	Regular	R
4	Aceptable	A
5	Eficiente	E

Identificación	
Especialidad/área	
Años experiencia	
Teléfono	
Correo	

Dirección: Campus matriz, La Libertad - prov. Santa Elena - Ecuador
Código Postal: 240204 - Teléfono: (04) 2-781732
www.upse.edu.ec

Dirección: Campus matriz, La Libertad - prov. Santa Elena - Ecuador
Código Postal: 240204 - Teléfono: (04) 2-781732
www.upse.edu.ec

Nota. Elaborado por la autora.

Anexo D. Encuestas para operadores.



Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Ingeniería Industrial

ENCUESTA DE VALIDACIÓN

Asunto: Cuestionario técnico dirigido a operadores y personal técnico.

Tema: Estudio de la eficiencia energética en el sistema de generación de vapor de la Refinería La Libertad, Santa Elena, Ecuador.

Objetivo del cuestionario: recopilar información técnica y operativa sobre el comportamiento del sistema de generación de vapor y su relación con la eficiencia energética.

Instrucción: marque con una X la opción que mejor represente su criterio, considerando la siguiente escala: 1 Totalmente en desacuerdo; 2 En desacuerdo; 3 Ni de acuerdo ni en desacuerdo; 4 De acuerdo; 5 Totalmente de acuerdo.

Firma: _____

N°	Preguntas	5	4	3	2	1
1	En la Planta Generación se registran de forma ordenada los consumos de combustible utilizados en las calderas.					
2	Los registros disponibles permiten conocer el consumo de combustible por cada caldera.					
3	Se identifican claramente las áreas o procesos que requieren mayor demanda de vapor.					
4	El personal operativo conoce cuáles son los principales usos del vapor dentro de la planta.					
5	Se analizan las variaciones de consumo de combustible cuando cambia la demanda de vapor.					
6	Se revisan los registros operativos para detectar consumos anormales de combustible.					
7	Existen procedimientos claros para operar el sistema de generación de vapor.					
8	Los procedimientos de operación ayudan a evitar desperdicios de vapor o combustible.					
9	Las novedades relacionadas con presión, vapor, combustible o fallas se registran durante la operación.					
10	Las novedades reportadas por los operadores son tomadas en cuenta para mejorar la operación del sistema.					

1	Inaceptable	I
2	Deficiente	D

3	Regular	R
4	Aceptable	A
5	Eficiente	E



Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Ingeniería Industrial

ENCUESTA DE VALIDACIÓN

Asunto: Cuestionario técnico dirigido a operadores y personal técnico.

Tema: Estudio de la eficiencia energética en el sistema de generación de vapor de la Refinería La Libertad, Santa Elena, Ecuador.

Objetivo del cuestionario: recopilar información técnica y operativa sobre el comportamiento del sistema de generación de vapor y su relación con la eficiencia energética.

Instrucción: marque con una X la opción que mejor represente su criterio, considerando la siguiente escala: 1 Totalmente en desacuerdo; 2 En desacuerdo; 3 Ni de acuerdo ni en desacuerdo; 4 De acuerdo; 5 Totalmente de acuerdo.

Firma: _____

N°	Preguntas	5	4	3	2	1
1	La empresa identifica oportunidades de mejora relacionadas con el uso de vapor y combustible.					
2	Las oportunidades de mejora energética se priorizan según su importancia para la operación.					
3	Se consideran los costos de combustible al momento de analizar mejoras en el sistema de generación de vapor.					
4	Se evalúa si las mejoras propuestas son viables para aplicarse en la operación del sistema.					
5	El mantenimiento de calderas, líneas de vapor y equipos relacionados ayuda a reducir pérdidas de energía.					
6	Las fugas de vapor, pérdidas de calor o fallas visibles son reportadas cuando se presentan.					
7	Los instrumentos de medición disponibles permiten controlar adecuadamente la operación del sistema.					
8	Se realiza seguimiento a los resultados obtenidos después de aplicar mejoras o correcciones operativas.					
9	El personal operativo puede aportar información útil para identificar problemas de eficiencia energética.					
10	Un plan de optimización energética ayudaría a mejorar el uso del combustible y del vapor en la Planta Generación.					

1	Inaceptable	I
2	Deficiente	D

3	Regular	R
4	Aceptable	A
5	Eficiente	E

Dirección: Campus matriz, La Libertad - prov. Santa Elena - Ecuador
Código Postal: 240204 - Teléfono: (04) 2-781732
www.upse.edu.ec

Dirección: Campus matriz, La Libertad - prov. Santa Elena - Ecuador
Código Postal: 240204 - Teléfono: (04) 2-781732
www.upse.edu.ec

Nota. Elaborado por la autora.

Anexo E. Ficha técnica del instrumento.

Anexo. Ficha técnica del instrumento – Sistema automatizado			Anexo. Ficha técnica del instrumento – Fabricación de paneles		
N°	Elemento	Descripción	N°	Elemento	Descripción
1	Nombre del instrumento	Cuestionario técnico para la evaluación del sistema de generación de vapor y su eficiencia energética.	1	Nombre del instrumento	Cuestionario técnico para la evaluación del sistema de generación de vapor y su eficiencia energética.
2	Autora	Ashley Belsabeth Diaz Suarez	2	Autora	Ashley Belsabeth Diaz Suarez
3	Fecha	2026	3	Fecha	2026
4	Objetivo	Recopilar criterios del personal operativo y técnico sobre las condiciones de operación del sistema de generación de vapor y su relación con la eficiencia energética.	4	Objetivo	Recopilar criterios del personal operativo y técnico sobre las condiciones de operación del sistema de generación de vapor y su relación con la eficiencia energética.
5	Dirigida a	Operadores, técnicos y personal relacionado con la operación o supervisión de la Planta Generación de la Refinería La Libertad.	5	Dirigida a	Operadores, técnicos y personal relacionado con la operación o supervisión de la Planta Generación de la Refinería La Libertad.
6	Administración	Presencial o digital	6	Administración	Presencial o digital
7	Aplicación	Directa, mediante cuestionario impreso.	7	Aplicación	Directa, mediante cuestionario impreso.
8	Duración	10–15 minutos	8	Duración	10–15 minutos
9	Tipo de ítems	Enunciados valorativos cerrados.	9	Tipo de ítems	Enunciados valorativos cerrados.
10	N° de ítems	10 ítems	10	N° de ítems	10 ítems
11	Distribución	Dimensión: Sistema de generación de vapor (10 ítems) D1: Registro operativo del sistema (2 ítems) D2: Demanda y uso del vapor (2 ítems) D3: Control del consumo operativo (2 ítems) D4: Procedimientos de operación (2 ítems) D5: Comunicación y reporte operativo (2 ítems)	11	Distribución	Dimensión: Eficiencia energética (10 ítems) D1: Identificación de oportunidades de mejora (2 ítems) D2: Evaluación económica y operativa (2 ítems) D3: Control de pérdidas energéticas (2 ítems) D4: Monitoreo del desempeño energético (2 ítems) D5: Plan de optimización energética (2 ítems)
12	Escala de medición	Escala ordinal Likert de 1 a 5.	12	Escala de medición	Escala ordinal Likert de 1 a 5.
13	Valores de la escala	Escalas Likert: Valor: Totalmente en desacuerdo 1 En desacuerdo 2 Neutro 3 De acuerdo 4 Totalmente de acuerdo 5	13	Valores de la escala	Escalas Likert: Valor: Totalmente en desacuerdo 1 En desacuerdo 2 Neutro 3 De acuerdo 4 Totalmente de acuerdo 5

Nota. Elaborado por la autora.

Anexo F. Validación del instrumento de medición.

Indicadores	Criterios	Inadecuado				Medianamente adecuado				Adecuado				Muy adecuado				Totalmente adecuado				Observaciones
		0 – 20				21 – 40				41 – 60				61 – 80				81 – 100				
		0	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71	76	81	86	91	96	
Aspectos de Validación		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
1. Claridad	Las sesiones están formuladas con lenguaje apropiado.																					
2. Objetividad	Las sesiones expresan conductas observables																					
3. Actualidad	Las sesiones están adecuadas a las teorías, enfoques o modelos teóricos.																					
4. Organización	Existe organización lógica entre las sesiones.																					
5. Suficiencia	Las sesiones comprenden los aspectos a necesarios a fortalecer.																					
6. Intencionalidad	Las sesiones valoran las dimensiones del tema.																					
7. Consistencia	Las sesiones están basadas en aspectos teóricos-científicos.																					
8. Coherencia	Las sesiones tienen relación con los indicadores de la variable independiente.																					
9. Metodología	Las sesiones responden al diseño de investigación metodológico.																					
10. Pertinencia	Las sesiones son útiles y adecuadas para modificar la variable dependiente.																					
INSTRUCCIONES: Esta ficha, sirve para que el EXPERTO EVALUADOR evalúe la pertinencia, eficacia del programa que se está validando. Deberá colocar la puntuación que considere pertinente a los diferentes enunciados.																						
Fecha:										Promedio:												
Experto:										Profesión:												
DNI/CI:										Celular:												

Nota. Elaborado por la autora.

Anexo G. Solicitud de aplicación del instrumento.

La libertad, 05 mayo del 2026

SOLICITUD PARA APLICAR INSTRUMENTO DE VALIDACIÓN POR EXPERTOS

Ing. Isabel Rocío Balón Ramos, PhD.
Directora de la Carrera de Ingeniería Industrial
Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Estatal Península de Santa Elena

Yo, Ashley Belsabeth Díaz Suárez, con C.I. 2450712852, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial, me encuentro desarrollando el trabajo de titulación denominado:
"Estudio de la eficiencia energética en el sistema de generación de vapor de la Refinería La Libertad, Santa Elena, Ecuador".
Por medio de la presente, solicito de manera respetuosa su autorización para aplicar el instrumento de validación por juicio de expertos, correspondiente al cuestionario técnico-operativo diseñado para la recolección de información relacionada con el sistema de generación de vapor y la eficiencia energética.
El propósito de esta validación es verificar la claridad, pertinencia, coherencia y suficiencia de los ítems propuestos, con el fin de garantizar que el instrumento sea adecuado para recopilar información útil en el desarrollo del trabajo de investigación.
Agradezco de antemano su atención y el respaldo brindado para continuar con el desarrollo del presente trabajo de titulación.

Ashley Belsabeth Díaz Suarez
Estudiante de Ingeniería Industrial
C.I. 2450712852

La libertad, 05 mayo del 2026

SOLICITUD PARA APLICAR ENCUESTA A PERSONAL OPERATIVO

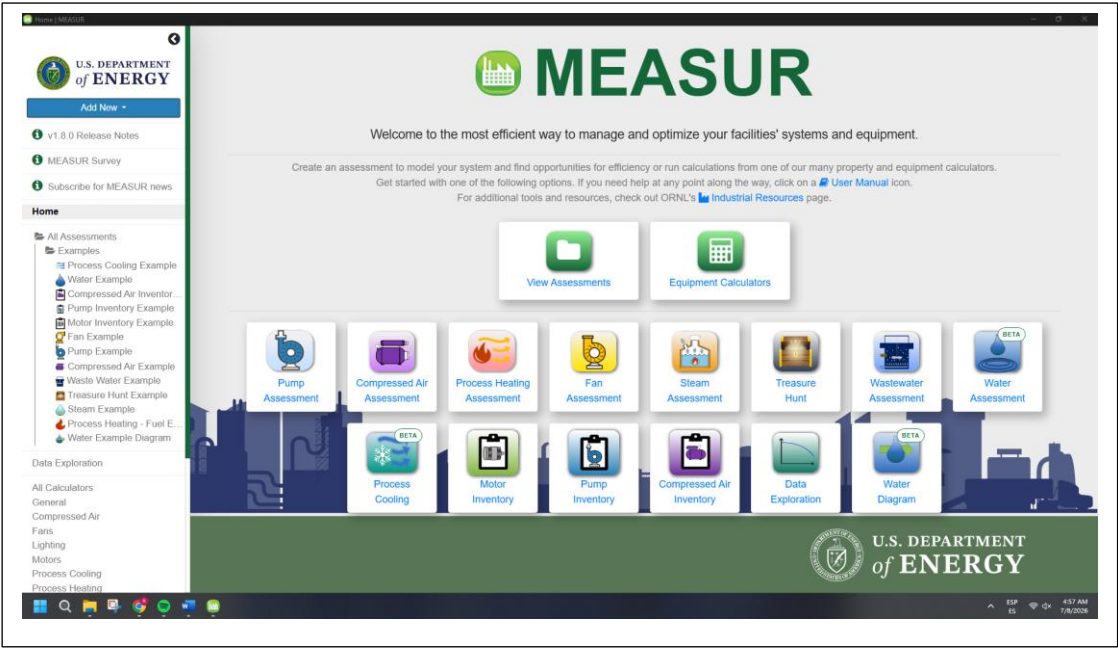
Ing. _____, PhD.
Cargo: _____
Refinería La Libertad

Yo, Ashley Belsabeth Díaz Suárez, con C.I. 2450712852, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me encuentro desarrollando el trabajo de titulación denominado:
"Estudio de la eficiencia energética en el sistema de generación de vapor de la Refinería La Libertad, Santa Elena, Ecuador".
Por medio de la presente, solicito de manera respetuosa su autorización para aplicar una encuesta técnica-operativa al personal relacionado directa o indirectamente con la Planta Generación de la Refinería La Libertad, con el propósito de recopilar información referente al uso del vapor, consumo de combustible, registros operativos, oportunidades de mejora y condiciones asociadas al desempeño energético del sistema de generación de vapor.
La información recolectada será utilizada únicamente con fines académicos y de investigación, manteniendo la confidencialidad de los datos proporcionados por el personal encuestado. La aplicación del instrumento no contempla intervención en los equipos, modificación de la operación ni afectación al desarrollo normal de las actividades de la planta.
Agradezco de antemano su atención y colaboración para el desarrollo del presente trabajo de titulación.
Atentamente,

Ashley Belsabeth Díaz Suarez
Estudiante de Ingeniería Industrial
C.I. 2450712852

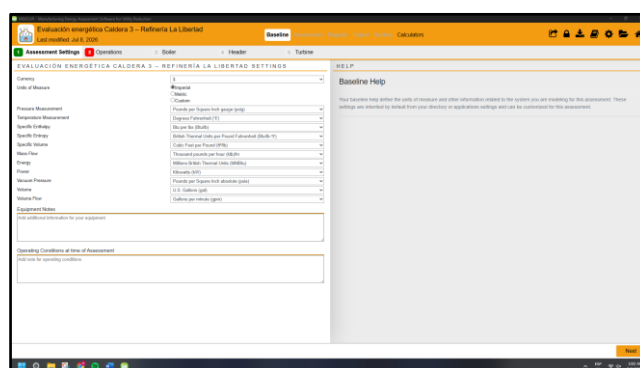
Nota. Elaborado por la autora.

Anexo H. Interfaz principal de MEASUR Tool.



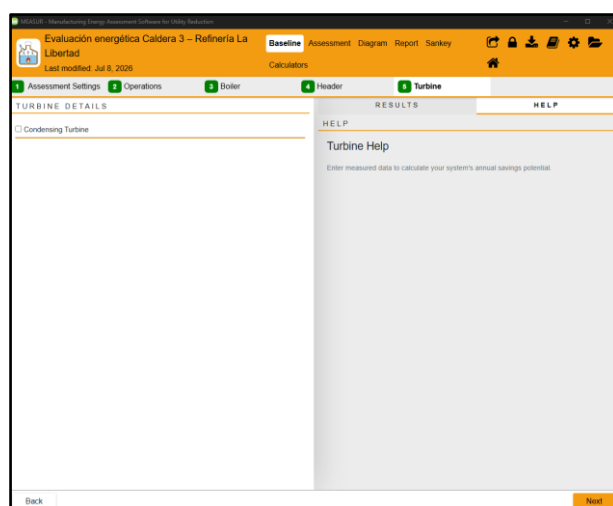
Nota. Elaborado por la autora.

Anexo I. Configuración de unidades del assessment aplicado a la caldera 3.



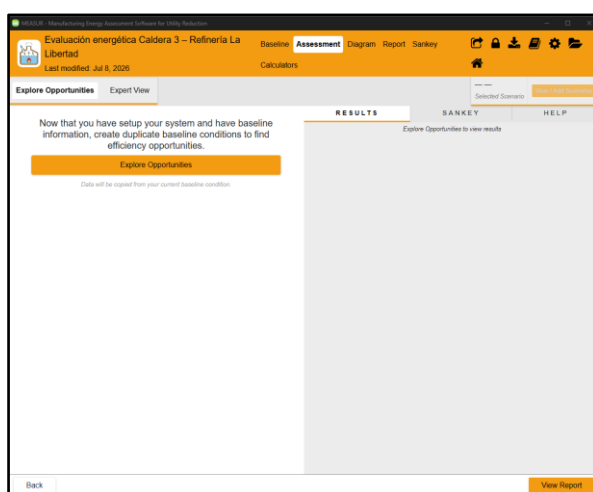
Nota. Captura de la configuración de unidades imperiales del modelo.

Anexo J. Delimitación del modelo sin turbina de condensación.



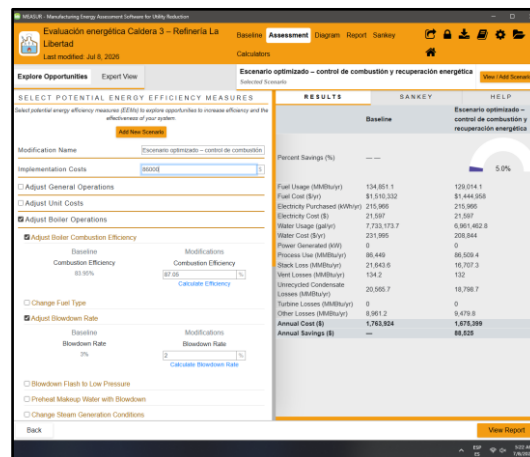
Nota. Captura que evidencia que el análisis se limitó al sistema de vapor.

Anexo K. Línea base configurada y habilitación de oportunidades de eficiencia.



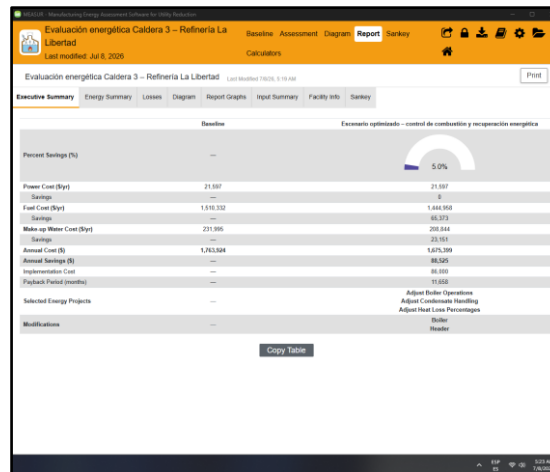
Nota. Captura de la pantalla assessment posterior a la configuración de la línea base.

Anexo L. Escenario optimizado con ajustes de combustión.



Nota. Captura del escenario optimizado con eficiencia de combustión de 87,05 %.

Anexo M. Reporte ejecutivo del escenario optimizado por MEASUR Tool.



Nota. Captura del reporte ejecutivo con ahorro de 5,0 %.