



UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL

Sede Central

Ingeniería Electromecánica

Propuesta de proyecto para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Electromecánica

“Análisis energético del sistema para generación y distribución de vapor saturado en una
empresa productora de materia prima en el área de alimentos durante el primer semestre del
2025”

María Fernanda Prado Hidalgo

2024



Acta de Aprobación 04-2025

En la ciudad de Alajuela, a los treinta días del mes de julio del año 2025 el Tribunal evaluador conformado por las personas: ING MARVIN SEGURA TREJOS, ING. JOSE LUIS PICADO ALFARO, ING. LIMBERO MORA VEGA, ING. JORGE SOLANO PORTUGUES , ING. EFRAIN DELGADO CASTILLO, proceden a evaluar la presentación del proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Electromecánica del estudiante María Fernanda Prado Hidalgo, identificación 117880444 , titulado " Análisis energético del sistema para generación y distribución de vapor saturado en una empresa productora de materia prima en el área de alimentos durante el primer semestre del 2025" modalidad proyecto de graduación. El Tribunal Evaluador apegado a las regulaciones y requisitos establecidos en el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación de la Universidad Técnica Nacional, realizó la revisión del proyecto del estudiante otorgando una calificación de 9.8 dando como resultado aprobado.

Ing. Marvin Segura Trejos
Director Licenciatura en Ingeniería Electromecánica y Lector

Ing. Jorge Luis Picado Alfaro (tutor)

Ma. Fernanda Prado Hidalgo (Estudiante)

Ing. Limber Mora Vega (Lector)

Ing. Jorge Solano Portugués (Lector externo)

Ing. Efraín Delgado Castrillo (Sector Industrial)

UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL LICENCIATURA EN INGENIERÍA

ELECTROMECAÁNICA

CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL LECTOR INTERNO DEL TRABAJO

FINAL DE GRADUACIÓN

Fecha: 30/07/2025

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: **“Análisis energético del sistema para generación y distribución de vapor saturado en una empresa productora de materia prima en el área de alimentos durante el primer semestre del 2025”** elaborado por la estudiante: **María Fernanda Prado Hidalgo** , como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de **Licenciado en Ingeniería Electromecánica.**

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su entrega ante el Comité de Trabajos Finales de Graduación.



ING. JORGE LUIS PICADO ALFARO (TUTOR)

LECTOR

UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL LICENCIATURA EN INGENIERÍA

ELECTROMECAÁNICA

CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL LECTOR INTERNO DEL TRABAJO

FINAL DE GRADUACIÓN


Fecha: 30/07/2025

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: **“Análisis energético del sistema para generación y distribución de vapor saturado en una empresa productora de materia prima en el área de alimentos durante el primer semestre del 2025”** elaborado por la estudiante: **María Fernanda Prado Hidalgo** , como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de **Licenciado en Ingeniería Electromecánica**.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su entrega ante el Comité de Trabajos Finales de Graduación.



ING. LIMBER MORA VEGA

LECTOR

UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL LICENCIATURA EN INGENIERÍA

ELECTROMECAÁNICA

CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL LECTOR EXTERNO DEL TRABAJO

FINAL DE GRADUACIÓN


Fecha: 30/07/2025

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: **“Análisis energético del sistema para generación y distribución de vapor saturado en una empresa productora de materia prima en el área de alimentos durante el primer semestre del 2025”** elaborado por la estudiante: **María Fernanda Prado Hidalgo** , como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de **Licenciado en Ingeniería Electromecánica**.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su entrega ante el Comité de Trabajos Finales de Graduación.



ING. JORGE SOLANO PORTUGUÉS

LECTOR EXTERNO

UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL LICENCIATURA EN INGENIERÍA

ELECTROMECAÁNICA

CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL LECTOR EXTERNO DEL TRABAJO

FINAL DE GRADUACIÓN

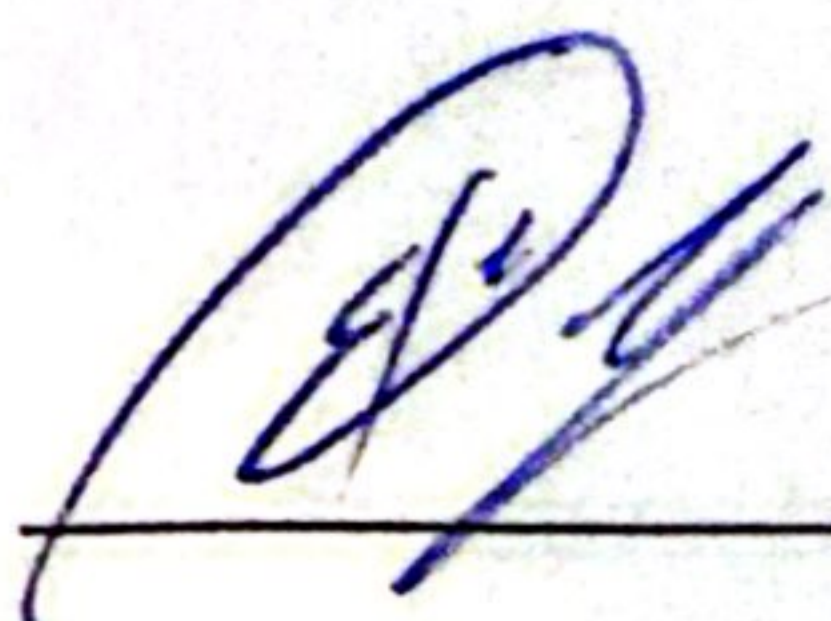
Fecha: 30/07/2025

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: **“Análisis energético del sistema para generación y distribución de vapor saturado en una empresa productora de materia prima en el área de alimentos durante el primer semestre del 2025”** elaborado por la estudiante: **María Fernanda Prado Hidalgo** , como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de **Licenciado en Ingeniería Electromecánica**.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su entrega ante el Comité de Trabajos Finales de Graduación.



ING. EFRAIN DELGADO CASTILLO

SECTOR INDUSTRIAL

CARTA DE FILÓLOGA

Heredía, 08 de julio del 2025

Señores (as)
Ingeniería Electromecánica
Universidad Técnica Nacional

Estimado Señor (as)

Por este medio, la suscrita Edith Raissa Pizarro Alfaro, cédula de identidad N° 401780133, miembro activo del Colopro bajo el número 35554 , doy fe de haber corregido exhaustivamente el documento titulado: ***"Análisis energético del sistema para generación y distribución de vapor saturado en una empresa productora de materia prima en el área de alimentos durante el primer semestre del 2025"***, que estuvo a cargo de la estudiante: **María Fernanda Prado Hidalgo** , con respecto a los siguientes aspectos:

1. Lexicografía, morfología, fondo y forma en su totalidad.
2. Uso correcto de las preposiciones.
3. Usos lingüísticos de los signos de puntuación, interrogación y exclamación.
4. Los solecismos, barbarismos, cacofonías, anfibologías, monotonía del lenguaje, redundancia, pleonasmos y la ortografía.

Por tanto, doy fe que este proyecto contiene un fondo claro y preciso de la propuesta expresada en el mismo, con ideas correctas, que mantienen el hilo conductor a lo largo del documento.

Atentamente,

EDITH RAISSA PIZARRO ALFARO
(FIRMA)

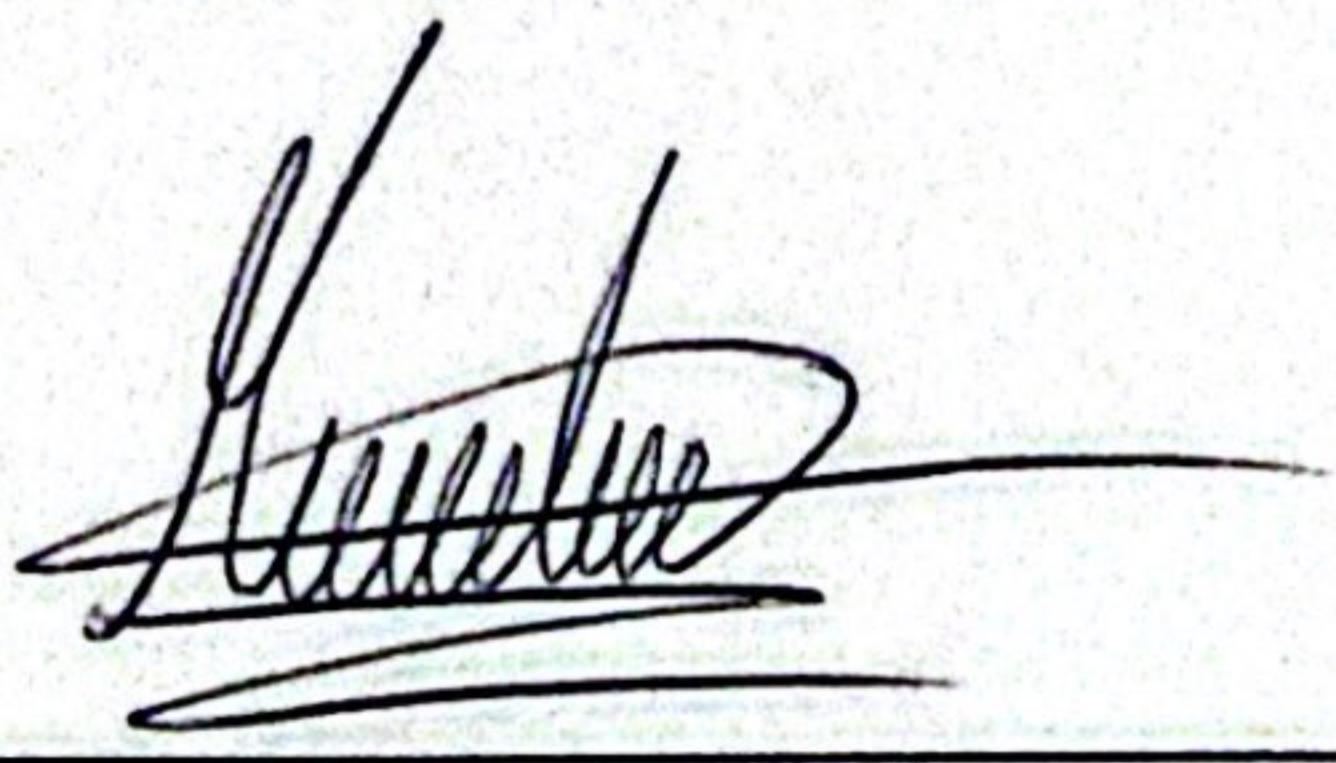
Firmado digitalmente
por EDITH RAISSA
PIZARRO ALFARO
(FIRMA)
Fecha: 2025.07.08
18:58:09 -06'00'

Lcda. Edith Raissa Pizarro Alfaro
Código 35554

DECLARACIÓN JURADA

El suscrito, **NOMBRE DEL ESTUDIANTE** con cédula de identidad número María Fernanda Prado Hidalgo, declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: Que soy el autor (a) del presente trabajo final de graduación, modalidad proyecto de graduación; para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica Nacional y que el contenido de dicho trabajo es obra original del suscrito.

Fecha: 30 - julio - 2025



Firma del estudiante

Resumen

El presente proyecto de graduación consistió en la implementación de un análisis energético en el sistema de generación y distribución de vapor saturado de una empresa dedicada a la producción de materia prima en el sector alimentario. El objetivo principal fue identificar fuentes de desperdicio energético, cuantificar las pérdidas actuales y proponer soluciones técnicas y económicas para mejorar la eficiencia del sistema durante el primer semestre del año 2025.

El sistema de vapor evaluado consume en promedio 243 787,69 litros de combustible bunker al mes, generando aproximadamente 3 831 856 kg de vapor. Sin embargo, se detectó una pérdida del 15% del vapor producido, equivalente a 574 870,76 kg/mes, debido a deficiencias en aislamiento, trampas de vapor defectuosas y un diseño ineficiente. Estas pérdidas generan alrededor de 17 144,8 kg de CO₂ anualmente, poniendo en riesgo el cumplimiento de la normativa ambiental nacional.

Mediante una metodología cuantitativa, se analizaron datos históricos, se realizaron mediciones con equipos especializados y se simularon escenarios de mejora. A partir de este diagnóstico, se propusieron cinco proyectos de eficiencia energética, entre ellos la mejora de la combustión en la caldera de 600 BHP, el cambio de trampas de vapor, la recuperación de vapor flash y el aislamiento de líneas críticas. Estas acciones permitieron un ahorro total estimado de 41 163 litros de bunker en 8 meses, mejorando la relación de consumo de bunker por tonelada de producto de 15,80 a 14,04 Lt/T.

En el análisis financiero, las propuestas presentaron indicadores positivos: una inversión total aproximada de ¢27,8 millones generó un ahorro estimado de ¢74 millones, resultando en un periodo de recuperación de solo 4 meses, un ROI superior al 160% y valores atractivos de VAN y TIR.

En conclusión, el proyecto demostró que la optimización del sistema de vapor no solo mejora la eficiencia energética y reduce el impacto ambiental, sino que también fortalece la viabilidad económica y la sostenibilidad operativa de la empresa.

Abstract

This graduation project involved the implementation of an energy analysis of the saturated steam generation and distribution system at a company dedicated to producing raw materials in the food sector. The main objective was to identify sources of energy waste, quantify current losses, and propose technical and economic solutions to improve system efficiency during the first semester of 2025.

The evaluated steam system consumes an average of 243,787.69 liters of bunker fuel per month, generating approximately 3,831,856 kg of steam. However, a 15% steam loss was detected—equivalent to 574,870.76 kg/month—due to deficiencies in pipe insulation, faulty steam traps, and inefficient system design. These losses result in approximately 17,144.8 kg of CO₂ emissions annually, putting the company at risk of noncompliance with national environmental regulations.

Through a quantitative methodology, historical data were analyzed, on-site measurements were taken using specialized instruments, and improvement scenarios were simulated. Based on this diagnosis, five energy efficiency projects were proposed, including improved combustion in the 600 BHP boiler, replacement of steam traps, recovery of flash steam, and insulation of critical lines. These actions resulted in an estimated total savings of 41,163 liters of bunker fuel over 8 months, improving the fuel-to-product ratio from 15.80 to 14.04 Lt/T.

The financial analysis showed positive indicators: a total investment of approximately ₱27.8 million led to estimated savings of ₱74 million, resulting in a payback period of just 4 months, a ROI above 160%, and favorable NPV and IRR values.

In conclusion, the project demonstrated that optimizing the steam system not only improves energy efficiency and reduces environmental impact but also strengthens the company's economic viability and operational sustainability.

Contenido

Capítulo I.....	12
1.1 Introducción.....	12
1.2 Área de estudio.....	14
Título.....	14
Línea de investigación.....	14
Área de investigación.....	14
<i>Tema de investigación</i>	14
Variables Cuantitativas de estudio.....	15
Objeto de estudio.....	15
1.3 Problemática.....	15
1.4 Justificación.....	19
1.5 Objetivos.....	21
1.5.1 Objetivo General.....	21
1.5.2 Objetivos Específicos.....	21
1.6 Alcance.....	22
1.7 Estrategia metodológica.....	26
1.7.1 Hipótesis.....	26
1.7.2 Definición de la Metodología de la investigación.....	30
1.7.3 Metodología de la investigación.....	30
Capítulo II.....	33
2.1 Marco teórico.....	33
2.1.1 El vapor como fluido y forma de energía:.....	33
2.1.2 Generadores de vapor.....	33
2.1.3 Sistemas de vapor.....	33

Calderas:	34
2.1.4 Tuberías, aislamiento de tuberías y accesorios.....	37
2.1.5 Disipación de calor en tuberías sin aislamiento	38
2.1.6 Recuperación de condensados	41
2.1.7 Pérdidas energéticas por trampas de vapor defectuosas	42
2.1.8 Sistemas de alimentación de agua y tratamiento de estas	43
2.1.9 ISO 50001	44
Capítulo III	46
3.1 Análisis de datos recolectados.....	46
3.1.1 Variables correspondientes a la generación de vapor:	46
➤ Consumo de combustibles:.....	48
➤ Factura de combustible mensual por tonelada de producción:.....	51
3.1.2 Generación de vapor.....	53
3.1.3 Distribución de vapor	58
3.1.4 Aislamiento de tuberías	59
3.1.5 Aislamiento de tuberías de alimentación de los calefactores y automatización de bunker.....	68
3.1.6 Control bombas de bunker.....	76
3.1.7 Eficiencia de Combustión de la caldera de 600BHP.....	89
3.1.9 Trampeo de Vapor	99
3.1.10 Vapor Flash	107
3.2 Monitoreo periódico de parámetros de operación de la caldera.....	114
3.3 Resultados del análisis de datos al implementar los proyectos planteados	119
Capítulo IV. Cálculo análisis de rentabilidad.....	122
Capítulo V Conclusiones	127

Capitulo VI Recomendaciones	129
Bibliografia.....	131
Anexos	132
1. Memoria de Cálculo:	132
3. Cálculos de rentabilidad:	147

Índice de Tablas

Tabla 1 Variables de Estudio.....	15
Tabla 2 Relación litros de bunker con toneladas de producción en 8 meses.....	23
Tabla 3 Indicadores y Variables de la Hipótesis	27
Tabla 4 Balance energético del vapor.....	47
Tabla 5 Datos caldera 600BHP	54
Tabla 6 Datos Caldera 350BHP	56
Tabla 7 Datos caldera 250BHP	57
Tabla 8 Calor perdido en tuberías sin aislamiento tuberías aséptico y clarificado.....	61
Tabla 9 Cálculo pérdidas con Aislamiento tuberías aséptico y clarificado	62
Tabla 10 Posible ahorro obtenido por aislamiento de tubería tuberías aséptico y clarificado	62
Tabla 11 Posible ahorro obtenido por aislamiento de tubería tuberías aséptico y clarificado	63
Tabla 12 Implementación del proyecto aislamiento tuberías aséptico y clarificado	65
Tabla 13 Cálculo de posibles ahorros de la implementación del proyecto aislamiento tuberías aséptico y clarificado	66
Tabla 14 Relación litros de combustible entre toneladas de producción posterior a la implementación del proyecto aislamiento tuberías aséptico y clarificado	67
Tabla 15 Calor perdido en tuberías sin aislamiento atomización y calefactor de las calderas	69
Tabla 16 Calor perdido en tuberías con aislamiento atomización y calefactor de las calderas	70
Tabla 17 Posible ahorro obtenido aislamiento de tuberías de alimentación de los calefactores y automatización de bunker	70
Tabla 18 Resumen de resultados proyecto aislamiento de tuberías de alimentación de los calefactores y automatización de bunker.....	71
Tabla 19 Implementación del proyecto aislamiento tuberías alimentación de los calefactores y automatización de bunker de las calderas 350 y 600BHP.....	72

Tabla 20 Posibles ahorros obtenidos aislamiento de tuberías de alimentación de los calefactores y automatización de bunker.....	74
Tabla 21 Relación de litros toneladas posterior a la implementación del proyecto aislamiento de tuberías de alimentación de los calefactores y automatización de bunker	75
Tabla 22 Posible ahorro de tiempo de operación de la bomba.....	77
Tabla 23 Posible ahorro control de bombas	84
Tabla 24 Resumen de resultados proyecto control de bombas de bunker.....	85
Tabla 25 Implementación del proyecto control de bombas.....	87
Tabla 26 Medición de gases caldera 600BHP	89
Tabla 27 Parámetros Recomendados de Operación	91
Tabla 28 Mejora en la eficiencia al reducir el porcentaje de oxígeno	92
Tabla 29 Posibles ahorros obtenidos por la corrección de eficiencia de combustión caldera 600BHP	93
Tabla 30 Implementación del proyecto mejora eficiencia combustión caldera 600BHP.....	96
Tabla 31 Relación de litros toneladas posterior a la implementación del proyecto mejora eficiencia combustión caldera 600BHP	98
Tabla 32 Trampas de Vapor del sistema total de la empresa en estudio	100
Tabla 33 Representación de Pérdidas de vapor kg/año	103
Tabla 34 Posibles ahorros obtenidos por la implementación del cambio de trampas de vapor	104
Tabla 35 Implementación del proyecto cambio de trampas de vapor	105
Tabla 36 Relación de litros toneladas posterior a la implementación del proyecto implementación del cambio de trampas de vapor.	106
Tabla 37 Parámetros del sistema para cálculo de recuperación de Vapor Flash.....	109
Tabla 38 Posibles ahorros obtenidos por la implementación del proyecto de recuperación de vapor flash	110
Tabla 39 Implementación del proyecto de recuperación de vapor flash	112
Tabla 40 Relación de litros toneladas posterior a la implementación del proyecto recuperación de vapor flash.....	113
Tabla 41 Tabla Comparativa de ahorro en litros y mejora en relación Lt/T por Proyecto (Enero-Agosto).....	119

Tabla 42 Comparación de parámetro Lt/Toneladas	120
Tabla 43 Estimación de CO ₂ evitado por proyecto (usando 2.68 kg CO ₂ por litro).....	121
Tabla 44 Análisis comparativo de bunker consumido en producción con el posible ahorro por las propuestas de mejora.....	122
Tabla 45 Resumen de Ahorro económico inversión y ahorro CO ₂ , según cada proyecto a implementar	123
Tabla 46 Representación indicadores financieros	124
Tabla 47 Determinación de ahorro y consumo de cada escenario	133
Tabla 48 Determinación de ahorro y consumo de cada escenario	134
Tabla 49 Representación esquema de funcionamiento.....	135
Tabla 50 Medición de gases de la carga y condiciones de operación	135
Tabla 51 Condiciones Ambientales.....	136
Tabla 52 Propiedades del bunker	136
Tabla 53 Composición química del búnker.....	137
Tabla 54 Resultados totales de ahorro en litros de bunker en 8 meses	147
Tabla 55 Análisis comparativo de bunker consumido respecto a la producción.....	147

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Consumo de combustible de enero a agosto del 2014	23
Gráfico 2. Consumo de litros de combustible bunker por mes por el sistema de calderas del año 2024	48
Gráfico 3. Combustible vs producción en toneladas	49
Gráfico 4. Producción en toneladas de los diferentes productos que distribuye la empresa .	50
Gráfico 5. Costo de Consumo de combustible en colones	52
Gráfico 6. Variación de Consumo de combustible bunker por mes	53
Gráfico 7. Representación Consumo de vapor por equipo consumidor de vapor	58
Gráfico 8. Comparación de eficiencia con corrección de curva de oxígeno	94
Gráfico 9. Comparación eficiencia actual vs eficiencia obtenida por ajuste de oxígeno con el Enerac 500	97

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.Red de Vapor y Retorno de Condensados.....	25
Ilustración 2.Clasificación de calderas por producción de vapor.....	35
Ilustración 3.Representación Red de Vapor y Retorno de Condensados	46
Ilustración 4.Representación Caldera 600 BHP	55
Ilustración 5.Tubería de vapor sin aislamiento en área de clarificado	59
Ilustración 6.Representación termográfica líneas asépticas	60
Ilustración 7.Tubería de vapor para atomización y calefactor de la caldera 350BHP.....	68
Ilustración 8.Bombas de alimentación de búnker de calderas.....	76
Ilustración 9.Tuberías de búnker en trincheras inundadas de agua	78
Ilustración 10.Representación de distribución de bunker actual hacia las calderas	79
Ilustración 11.Propuesta de nueva distribución de tubería de bunker a las calderas.....	80
Ilustración 12.Propuesta de nueva distribución de tubería de bunker a las calderas vista frontal	81
Ilustración 13.Representación PLC S7-1200	82
Ilustración 14.Representación Ladder de la programación a implementar para el PLC	83
Ilustración 15.Eficiencia de combustión de la caldera de 600BHP.....	89
Ilustración 16.Captura térmica de la Trampa TV20 línea aséptica de intercambiador de calor tubular.....	101
Ilustración 17. Captura térmica de la trampa TV22 EPR ubicada en la llenadora 1 en obstrucción	102
Ilustración 18.Resistencia en válvulas y accesorios expresada en longitud equivalente. ..	132
Ilustración 19.Temperatura de conductividad	132
Ilustración 20.Temperatura de conductividad	133
Ilustración 21.Características de las bombas.....	134
Ilustración 22.Conductividad térmica para materiales comunes	148
Ilustración 23.Factor transferencia de Calor.....	149
Ilustración 24.Propiedades de tubería comercial.....	150
Ilustración 25.Precio Combustible	151
Ilustración 26.Poder Calorífico de los combustibles	152

Capítulo I

1.1 Introducción

En el sector de la producción de alimentos, la eficiencia en el uso de recursos energéticos es un factor esencial para la sostenibilidad económica y ecológica de las empresas.

Para efectos del estudio, el nombre de la empresa se mantendrá de forma anónima, esta desempeña un papel de gran relevancia en el sector de producción de materia prima por lo que utiliza un sistema de producción de vapor para llevar a cabo procesos esenciales como la cocción, la pasteurización y la limpieza de equipos. No obstante, el sistema actual enfrenta importantes desafíos en cuanto a eficiencia energética, lo que conlleva a un elevado uso de combustible y a la generación de emisiones de CO₂ que no solo perjudican el medio ambiente, sino que también amenazan el cumplimiento de las regulaciones ambientales vigentes. Estas ineficiencias no solo implican un desembolso adicional en su funcionamiento, sino que también representan un gasto adicional en la operación.

En este contexto, el propósito de este es llevar a cabo un análisis energético del sistema de vapor de la empresa en estudio, con el propósito de identificar potenciales fuentes de desperdicio, medir las pérdidas y sugerir mejoras para incrementar la eficiencia y disminuir las pérdidas de vapor. Este se realizará en el primer semestre de 2025 y su objetivo no solo será mejorar el uso de combustible, sino también aportar al cumplimiento de regulaciones medioambientales que resultan vitales para el funcionamiento constante de la compañía.

La investigación sugiere cuatro objetivos específicos: evaluar las pérdidas de energía, identificar las principales fuentes de pérdidas de energía, estimar el potencial de ahorro de combustible y reducción de emisiones de CO₂, con el fin de generar una mejora en la eficiencia energética. Estos objetivos marcan la dirección del estudio, ya que estos son factores clave en el análisis de energía del sistema de vapor de la compañía, lo que permite detectar las posibles fuentes de residuos de energía a partir de la determinación cuantitativa de sus pérdidas, para luego identificar oportunidades de aprovechamiento que mejoren la eficiencia del sistema de vapor durante el primer semestre del año 2025.

Con estos objetivos, se pretende proporcionar a la empresa en estudio las herramientas y recomendaciones valiosas para disminuir los impactos medioambientales de sus operaciones, incrementar su competitividad y asegurar su viabilidad a largo plazo. Así como determinar desde el ámbito de la ingeniería electromecánica, las mejoras técnicas que se deben realizar para cumplir estos objetivos.

Debido a esto, este trabajo constituye una contribución significativa no solo para la empresa, sino también para el sector alimentario en general, que está experimentando presiones crecientes para adoptar prácticas más sustentables. La optimización de recursos energéticos como el vapor no solo lleva a un funcionamiento más rentable, sino también a un rendimiento más eficiente.

1.2 Área de estudio

Título

“Análisis energético del sistema para generación y distribución de vapor saturado en una empresa productora de materia prima en el área de alimentos durante el primer semestre del 2025”

Línea de investigación

Energía

Área de investigación

Energía y Eficiencia Energética en Procesos Industriales

Tema de investigación

Realizar un análisis energético de un sistema de generación de vapor saturado en la empresa productora de materia prima en el sector alimenticio.

Variables Cuantitativas de estudio

Tabla 1

Variables de Estudio

	Eficiencia	Reducción de Costos	Mejora de características
Indicadores		- Tasa Interna de Retorno (TIR, %).	
	- Eficiencia de la caldera (%)	- Valor actual neto (VAN US\$).	- Disminución de pérdidas de vapor (% del vapor generado).
	- Emisiones de CO2 (kg/año).	- Periodo de recuperación de la inversión (años).	- Emisiones de CO2 (kg o toneladas)
	- Energía recuperada KW/h por tonelada producida.	- Relación costo-beneficio (USD invertido/USD ahorrado). - Beneficios económicos generados (USD/año).	

Nota. Elaboración propia.

Objeto de estudio

Los parámetros operativos y el uso de la energía en el sistema de generación y distribución de vapor saturado de una empresa productora de materia prima para alimentos, durante el primer semestre de 2025.

1.3 Problemática

La empresa en estudio desempeña un papel destacado en el sector de producción de alimentos, esta se especializa en productos completamente naturales y orgánicos, además cabe destacar que desde su inicio ha tenido un enfoque de exportador, destacándose en la región como una organización innovadora y comprometida con estándares de calidad certificados ISO 9001.

Actualmente, cuenta con un sistema de generación de vapor que cumple con una función de vital importancia, tanto para procesos como cocción, pasteurización de los productos hasta los procesos de limpieza de los equipos. Sin embargo, este sistema presenta desafíos significativos que afectan su eficiencia energética, generan un impacto ambiental considerable y representan un obstáculo para el adecuado cumplimiento normativo.

La producción excesiva en emisiones de CO₂ cercanas a 17 144.8 kg/año genera un factor de relevancia que coloca a la empresa en riesgo de incumplir las regulaciones ambientales establecidas en el Reglamento sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Provenientes de Calderas y Hornos de Tipo Indirecto (N° 36551-S-MINAET-MTSS). Esto amenaza la obtención del permiso de operación de las calderas emitido por el Ministerio de Salud de Costa Rica, indispensable para su continuidad operativa. Además, los altos costos asociados al consumo de bunker afectan la competitividad de la empresa, que necesita mejorar su eficiencia y alinearse con las tendencias de sostenibilidad del sector.

En este contexto, la empresa busca reducir su consumo de combustibles al menos en un 10% lo que permitirá mitigar su impacto ambiental disminuyendo sus emisiones de CO₂. Sin una intervención eficiente, persistirá la pérdida del 15% del vapor generado y se mantendrán niveles insostenibles de consumo energético, limitando la capacidad de la empresa en estudio para operar de forma rentable y responsable con el medio ambiente.

El sistema de generación de vapor de la empresa consume en promedio 243 787.69 litros de bunker al mes, esto de acuerdo con la información suministrada por parte de la empresa, la cual indica que la producción mensual total es de 3 831 856.26 kg de vapor (8 449 789.18 libras de vapor), un 85% se utiliza en procesos productivos, mientras que un 15% lo cual se traduce alrededor de 574 870.76 kg de vapor (1 267 468.38 libras vapor) por mes se pierde debido a ineficiencia, esto según los datos históricos del año 2023. Las principales causas de estas pérdidas pueden atribuirse a un diseño ineficiente del sistema de vapor, la antigüedad de los equipos (que reduce su rendimiento energético) y la operación continua durante 24 horas, lo que incrementa significativamente las pérdidas de energía.

Impacto desde los diferentes puntos de vista.

➤ Social:

- Bienestar de la comunidad: El incumplimiento de las normativas ambientales y el exceso de emisiones contaminantes pueden afectar la calidad del aire, perjudicando la salud de las comunidades cercanas siendo este un factor de la problemática que afecta el impacto ambiental.
- Percepción de responsabilidad social: La sociedad valora cada vez más a las empresas que operan de manera sostenible. La empresa tiene la oportunidad de reforzar su compromiso social mediante la adopción de prácticas energéticas responsables, abordando así la problemática derivada de la falta de iniciativas de ahorro energético.

➤ Impacto en la reputación de la empresa:

- Reputación corporativa: En la actualidad, los consumidores valoran cada vez más la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental; por ello, la reputación de la empresa podría verse afectada si no implementa medidas para optimizar su eficiencia energética y reducir sus emisiones, lo que podría generar una percepción negativa entre clientes, empleados y socios estratégicos.
- Relaciones con inversores y socios: Una empresa con prácticas insostenibles podría tener dificultades para atraer inversores o mantener relaciones con socios que exigen prácticas responsables y sostenibles. Esto podría afectar la capacidad de la empresa para acceder a financiamiento o colaboraciones estratégicas.

➤ Económico:

- Costos de cumplimiento normativo: Si no se implementan mejoras para reducir las emisiones de CO₂, la empresa podría enfrentar sanciones económicas o restricciones operativas, generando costos adicionales. Además, las inversiones futuras necesarias para cumplir con la normativa podrían resultar más costosas si no se implementan soluciones preventivas desde el inicio.

- Pérdida de ingresos potenciales: En un contexto de mercado donde los consumidores valoran la sostenibilidad, la falta de prácticas eficientes podría hacer que la empresa pierda oportunidades de mercado frente a competidores más sostenibles.
- Tecnológico:
- Innovación y optimización: La empresa tendrá la oportunidad de adoptar procesos más sostenibles e innovadores, lo que también puede reducir el tiempo de inactividad de los equipos. La tecnología obsoleta y el diseño ineficiente del sistema de vapor limitan la capacidad de la empresa para incorporar nuevas tecnologías de eficiencia energética, que optimizarían el consumo de combustible y reducirían las emisiones. Esta falta de actualización tecnológica retrasa la innovación y reduce la competitividad de la empresa.
 - Modernización del sistema de vapor: La implementación de nuevas tecnologías, tales como sistemas de control automatizados o equipos de mayor eficiencia, aumentará el rendimiento energético abarcando así un factor de la problemática como es la obsolescencia de los equipos.
- Ambiental:
- Reducción de emisiones de CO₂: Mitigar las emisiones en al menos 17,144.8 kg de CO₂/año contribuirá a los esfuerzos globales contra el cambio climático.
 - Menor consumo de recursos naturales: La optimización del uso del bunker disminuirá la demanda de combustibles fósiles, reduciendo la huella ambiental de la empresa.
 - Cumplimiento de normativas ambientales: Mantenerse dentro de los límites normativos garantizará que la empresa opere de manera sostenible y responsable.

➤ Político:

- Cumplimiento de regulaciones: La empresa está en riesgo de no cumplir con el Reglamento sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Provenientes de Calderas y Hornos de Tipo Indirecto (N° 36551-S-MINAET-MTSS), lo cual podría resultar en sanciones, multas o incluso en la suspensión de la operación del sistema de calderas. Esto afectaría directamente su continuidad operativa.
- Relación con las autoridades: Cumplir con las normativas fortalecerá la relación con las entidades gubernamentales, facilitando futuras autorizaciones o incentivos para proyectos sostenibles.
- Contribución a políticas nacionales: La empresa contribuirá a los compromisos del país en términos de reducción de emisiones, posicionándose como un aliado en la agenda ambiental y energética nacional.

1.4 Justificación

La empresa en estudio es una organización clave en el sector alimentario que depende de un sistema de generación de vapor para llevar a cabo procesos críticos, como la cocción, pasteurización y limpieza de equipos. Sin embargo, este sistema enfrenta ciertas ineficiencias que no solo incrementan los costos operativos, sino que también generan un impacto ambiental significativo debido al alto consumo de combustible bunker y la emisión de aproximadamente 17 144.8 kg de CO₂/año. Estas fallas en la gestión de recursos comprometen la rentabilidad de la empresa y la colocan en riesgo de incumplir con la normativa nacional establecida en el Reglamento sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Provenientes de Calderas y Hornos de Tipo Indirecto (N° 36551-S-MINAET-MTSS).

En este contexto, la optimización del sistema de generación de vapor es una necesidad apremiante para la empresa, tanto desde el punto de vista económico como ambiental. La dependencia de combustibles fósiles como el bunker incrementa los costos de producción, afectando la competitividad de la empresa, esto en un mercado que demanda cada vez, más prácticas sostenibles. Asimismo, la pérdida del 15% del vapor generado debido a ineficiencias del sistema agrava la situación, ya que este vapor no aprovechado representa un

desperdicio energético significativo que podría recuperarse para mejorar el rendimiento del sistema.

El presente proyecto tiene como objetivo analizar de manera exhaustiva el sistema de generación de vapor de la empresa, con el fin de identificar y evaluar oportunidades de recuperación de energía que contribuyan a una reducción mínima del 10% en el consumo de combustible, así como a la disminución de las emisiones de CO₂ hasta niveles compatibles con las normativas ambientales vigentes. La implementación de tecnologías eficientes y el aprovechamiento de recursos energéticos residuales no solo garantizarán la continuidad operativa al mantener los permisos necesarios, sino que también fortalecerán la imagen de la empresa como una organización comprometida con la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental.

Desde una perspectiva económica, el proyecto permitirá reducir los costos operativos mediante un uso más eficiente del bunker, lo que incrementará la rentabilidad y la competitividad de la empresa. En términos sociales, la disminución de emisiones beneficiará la salud de las comunidades cercanas al mejorar la calidad del aire, mientras que, internamente, la mejora del sistema reducirá los tiempos de mantenimiento, favoreciendo las condiciones laborales de los trabajadores. Además, desde un enfoque tecnológico, el proyecto ofrece la oportunidad de modernizar equipos y adoptar procesos innovadores que optimicen la producción.

Por lo tanto, este análisis representa una contribución relevante tanto para la empresa como para el desarrollo sostenible del sector. Los resultados del proyecto buscan proporcionar las bases para la toma de decisiones estratégicas orientadas a la optimización del consumo energético y el cumplimiento normativo. Este trabajo también aporta conocimiento técnico aplicable a otras empresas del sector alimentario, donde la eficiencia energética es fundamental para alcanzar la rentabilidad y sostenibilidad a largo plazo.

En resumen, el presente proyecto tiene una doble finalidad: por un lado, garantizar la viabilidad operativa y la rentabilidad económica de la empresa y por otro, contribuir con prácticas sostenibles que minimicen el impacto ambiental de la empresa, alineándose con las tendencias globales de eficiencia y responsabilidad ambiental.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Implementar el análisis energético del sistema de vapor de la empresa productora de materia prima, para la detección de las posibles fuentes de desperdicio energético a partir de la cuantificación de sus pérdidas, para la identificación de oportunidades de aprovechamiento durante el primer semestre del año 2025.

1.5.2 Objetivos Específicos

1. Identificar las fuentes principales de desperdicio de vapor en el sistema de vapor actual mediante un análisis de su operación y equipos consumidores, durante los primeros tres meses del año 2025, para la obtención de la cuantificación de las pérdidas actuales.
2. Cuantificar el impacto de la reducción del consumo de combustible y las emisiones de CO₂, determinando los beneficios ambientales y económicos que la optimización del sistema de vapor genera para la empresa contribuyendo a la sostenibilidad y rentabilidad de una empresa.
3. Elaborar un “checklist” o lista para el monitoreo periódico de los principales parámetros operativos del sistema de generación de vapor, promoviendo a los técnicos de la empresa la verificación del cumplimiento de condiciones que favorezcan una mejoría en la operación y seguridad de la caldera durante los primeros tres meses del año 2025
4. Desarrollar un análisis de rentabilidad de las propuestas de mejora que permita a la empresa una evaluación de las propuestas de solución al desperdicio de energía, utilizando indicadores financieros que justifiquen su implementación.

1.6 Alcance

El propósito de esta investigación es realizar un análisis detallado del sistema de generación de vapor de la empresa. Se desarrollará de manera que se puedan identificar las principales fuentes de desperdicio de energía, cuantificar las pérdidas y proponer soluciones enfocadas en mejorar la eficiencia y reducir el consumo de combustible.

Se examinarán los mecanismos de recuperación de calor implementados y su efectividad en la reducción del consumo de combustible. Además, se evaluarán indicadores de eficiencia energética y se identificarán áreas de mejora para optimizar el rendimiento del sistema. El objetivo es ofrecer recomendaciones prácticas que contribuyan a la sostenibilidad y eficiencia operativa de la empresa, alineándose con las mejores prácticas en la gestión de recursos energéticos.

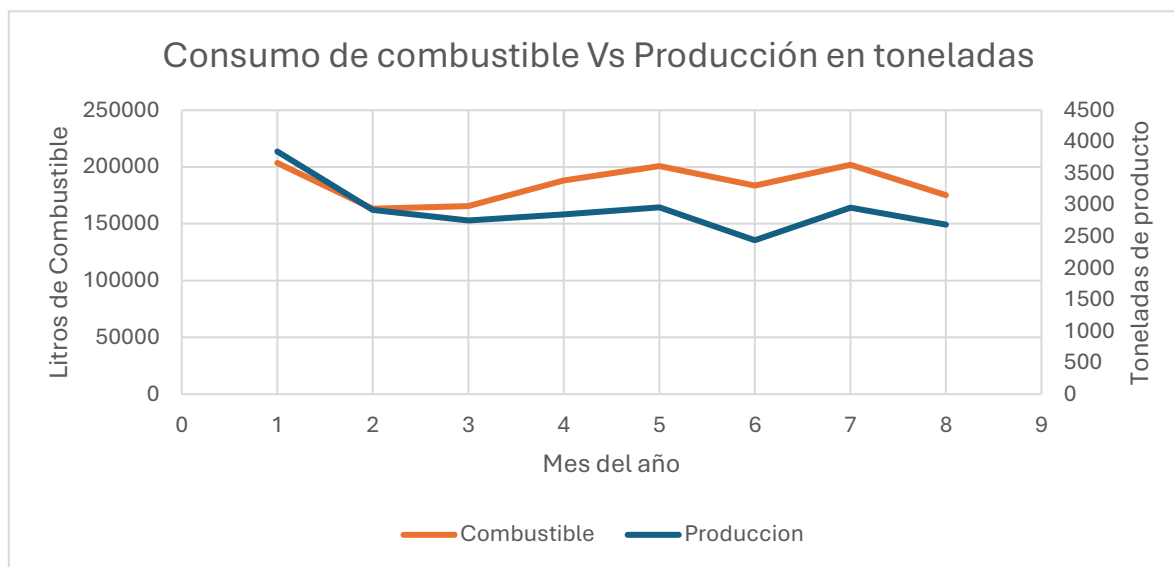
El estudio abarcará los siguientes aspectos:

1. Evaluación del sistema actual de generación de vapor: Se realizará un diagnóstico de los equipos y procesos que componen el sistema, con el fin de detectar ineficiencias que estén contribuyendo al desperdicio de energía. Esto incluirá la revisión de las calderas, las líneas de distribución de vapor y los procesos que utilizan vapor, como cocción, pasteurización y limpieza de equipos, además del estado de las tuberías de vapor y cálculo de pérdida de calor ya que no cuentan con aislante, así como un análisis de las trampas de vapor que cuenta el sistema con el fin de obtener un cálculo del retorno de condensado actual.

Toda esta evaluación partiendo de la línea de base energética que se logra determinar con base en los datos históricos, en este caso se tiene como promedio actual un consumo de bunker de 186.37 litros/mes. Lo cual, se puede ver reflejado en la gráfica 1, así mismo se cuenta con una comparación respecto a la producción en toneladas de los diversos productos teniendo un promedio de 2925.39 toneladas de producto, dentro de los factores de ajuste se cuenta con variaciones en la demanda de producción o mejorar a nivel de mantenimiento que pueden generar cambios en la línea base.

Gráfico 1

Consumo de combustible de enero a agosto del 2014



Nota. Elaboración propia.

Esto se traduce a una relación de los litros de bunker implementados con las toneladas de producción, obteniendo así un promedio de 15.8 litros por tonelada producida, esto se ve reflejado en la tabla 2.

Tabla 2

Relación litros de bunker con toneladas de producción en 8 meses

Mes	Consumo Búnker (litros)	Producción (toneladas)	Litros/tonelada
Enero	186,250	3,846.14	48.4
Febrero	203,600	2,918.47	69.8
Marzo	163,300	2,752.01	59.3
Abril	165,700	2,848.92	58.2
Mayo	188,000	2,961.11	63.5
Junio	200,700	2,439.32	82.3
Julio	183,600	2,953.13	62.2
Agosto	201,850	2,684.06	75.3
Promedio	186,625	2 925.39	64.8

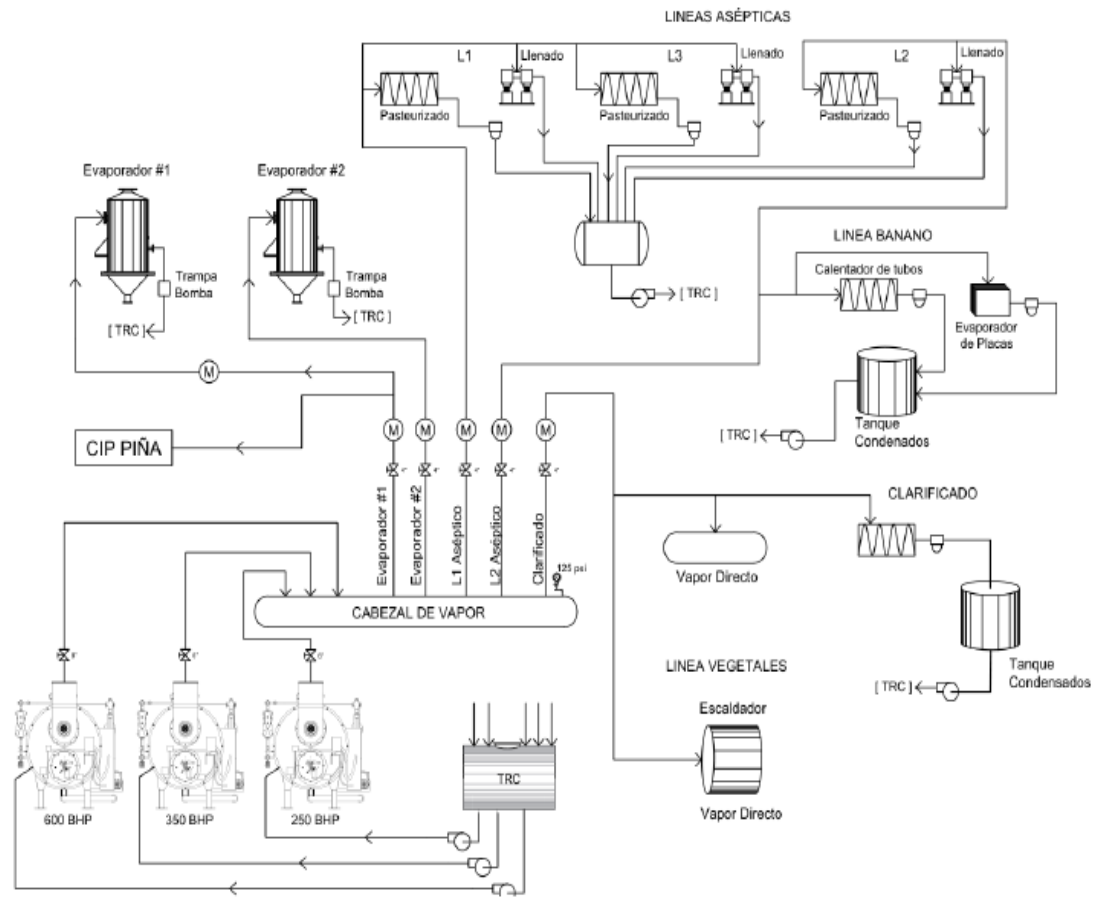
2. Cuantificación de pérdidas energéticas: A través de mediciones y cálculos, se determinará el volumen de vapor perdido y el exceso de consumo de combustibles (bunker) debido a las ineficiencias del sistema, dentro de las principales causas que se quiere analizar es el aislante en las tuberías que genera una pérdida en el calor debido a que este se conduce a través de las paredes de la tubería no aislada hacia el ambiente más frío o viceversa. Otra causa es el poco retorno de condensado debido al estado de las trampas de vapor, por lo que se debe realizar el análisis de las 40 trampas que tiene el sistema.
3. Propuestas de soluciones: Se desarrollarán estrategias y soluciones técnicas para reducir las pérdidas de vapor, aumentar la eficiencia de los equipos y optimizar el consumo de combustible. Estas soluciones incluirán tanto la actualización de equipos como la reingeniería de procesos se pretende validar estas propuestas por medio de cálculos numéricos que permitan evidenciar una mejora en ahorro de combustible, así como menor pérdida de energía en el sistema como lo es la implementación de aislamiento en tuberías que actualmente genera un alto porcentaje de pérdidas energéticas.
4. Análisis económico y financiero: Se evaluará la viabilidad económica de las soluciones propuestas, utilizando indicadores financieros como el retorno de inversión, el periodo de recuperación de la inversión y el ahorro económico anual esperado, para justificar la implementación de las mejoras.

El estudio se llevará a cabo durante el primer semestre del año 2025, y estará limitado al sistema de generación de vapor de la empresa como los son 3 calderas, una de 600BHP, una de 350BHP y una de 250BHP, sus equipos consumidores, sistema de retorno de condensados, trampas de vapor, pérdida de energía en la tubería utilizada para llevar el vapor a los equipos consumidores, sin incluir otros sistemas de la planta o actividades fuera de la producción de alimentos. Además, el análisis económico estará basado en los costos y precios vigentes en el mercado en el momento de la investigación.

En la Ilustración 1 se puede observar una representación del sistema de vapor, lo indicado como TRC hace referencia al retorno de condensado que se tiene a la línea principal.

Ilustración 1

Red de Vapor y Retorno de Condensados



Nota. Elaboración propia.

1.7 Estrategia metodológica

1.7.1 Hipótesis

Las pérdidas en el sistema de vapor serán representativas para plantear propuestas de mejora con el fin de reducir el consumo de bunker de las calderas, así como evitar dichas pérdidas a nivel de diseño. A partir de esta situación se plantean cuatro preguntas que permite el desarrollo del proyecto.

1. ¿Constituyen el diseño del sistema y su antigüedad la principal fuente de desperdicio energético en el sistema de generación de vapor de la empresa?
2. ¿Qué metodologías y herramientas pueden emplearse para cuantificar el consumo de combustible y las pérdidas de vapor, y de qué manera estos datos pueden orientar el diseño de estrategias efectivas para la optimización energética en sistemas industriales?
3. ¿Puede la implementación de un nuevo sistema de trampas de vapor y aislamiento de tuberías reducir el consumo de combustible en al menos un 10 %, mediante mejoras específicas en el sistema de generación de vapor?
4. ¿Es posible lograr una reducción significativa de las emisiones de CO₂ que contribuya al cumplimiento normativo y a la mejora de la sostenibilidad ambiental de la empresa?

Así mismo a partir de las hipótesis propuestas se implementaron las variables e indicadores a implementar para el desarrollo del proyecto en conjunto con los objetivos propuestos esto se puede observar a detalle en la tabla 2.

Tabla 3*Indicadores y Variables de la Hipótesis*

Objetivo	Indicadores	Variables	Parámetros
Implementar un análisis energético del sistema de vapor de la empresa, para la detección de las posibles fuentes de desperdicio energético, a través de la cuantificación de las pérdidas y la identificación de formas de aprovechamiento que reduzcan las pérdidas de vapor, durante el primer semestre del año 2025.	<ul style="list-style-type: none">• Emisiones de CO2 (kg/año).• Bunker: 68.4 litros por tonelada producida.	<ul style="list-style-type: none">• Cantidad de vapor generado, pérdidas y combustible	<ul style="list-style-type: none">• Consumo de combustible (litros/mes).• Pérdidas de vapor (% del vapor generado).• Emisiones de CO2 (kg/año).
Identificar las fuentes principales de desperdicio energético en el sistema de vapor mediante un análisis detallado de la operación y	<ul style="list-style-type: none">• Porcentaje de fuentes de desperdicio energético identificadas (%).	<ul style="list-style-type: none">• Rendimiento de equipos clave (eficiencia térmica, antigüedad, diseño).	<ul style="list-style-type: none">• Pérdidas energéticas en cada equipo del sistema (kg de vapor).

<p>equipos, durante los primeros tres meses del año 2025, para la obtención de la cuantificación de las pérdidas actuales.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de pérdidas energéticas cuantificadas (kg vapor/mes). 	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de equipos evaluados. 	
<p>Cuantificar el impacto de la reducción del consumo de combustible y las emisiones de CO2, determinando los beneficios ambientales y económicos que la optimización del sistema de vapor genera para la empresa contribuyendo a la sostenibilidad y rentabilidad de esta.</p>	<p>Bunker: 64.8 litros por tonelada producida</p> <p>Reducción en las emisiones de CO2 (kg/año).</p> <p>Beneficios económicos generados (USD/año).</p>	<p>Precio del combustible (USD/litro).</p> <p>Factor de emisión del bunker (kgCO2/litro).</p> <p>Reducción efectiva en pérdidas de vapor (%).</p>	<p>Emisiones previas y posteriores a la optimización (kg de CO2/año).</p> <p>Consumo de bunker antes y después de las mejoras (litros/mes).</p> <p>Costos del bunker ahorrados (USD/mes).</p>
<p>Elaborar un “checklist” o lista para el monitoreo periódico de los principales parámetros operativos del sistema de generación de vapor, promoviendo a los técnicos de la</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia de revisión del sistema (veces/mes o trimestre). 	<ul style="list-style-type: none"> • Datos registrados en el sistema de monitoreo (temperatura, presión). 	<ul style="list-style-type: none"> • Número de parámetros monitoreados (temperatura, presión, flujo).

empresa la verificación del cumplimiento de condiciones que favorezcan una mejoría en la operación y seguridad de la caldera durante los primeros tres meses del año 2025.

Desarrollar un análisis económico que permita a la empresa una evaluación de la viabilidad de las propuestas de solución al desperdicio de energía, utilizando indicadores financieros que justifiquen su implementación.

- Relación costo-beneficio (USD invertido/USD ahorrado).
- Tasa Interna de Retorno (TIR, %).
- Valor actual neto (VAN US\$).
- Periodo de recuperación de la inversión (años).

- Costos de implementación de las mejoras (materiales, mano de obra).
- Ingresos por ahorros energéticos y ambientales.
- Desglose de costos operativos.

- Frecuencia de mantenimiento preventivo.

- Costos iniciales de implementación (USD).
- Ahorros generados por las mejoras (USD/mes o USD/año).

Nota. Elaboración propia.

1.7.2 Definición de la Metodología de la investigación

1. Tipo de investigación: Cuantitativa, aplicada y descriptiva.
2. Instrumentos de recolección: Hojas de registro Excel, instrumentos de medición de vapor y combustión ENERAC 500, consumo de combustible por facturación, software de simulación energética, análisis financiero.
3. Fuentes de datos: Datos históricos de la planta, mediciones en sitio, estudios de viabilidad técnica y económica, dicho análisis es realizado para todo el sistema o población en donde se pretende analizar en este caso se hace referencia a todos los elementos del sistema tomando en cuenta los consumidores, trampas y tuberías.

1.7.3 Metodología de la investigación

La metodología de esta investigación estará dividida en cuatro fases principales: recolección de datos, análisis del sistema, propuesta de soluciones y evaluación económica. El enfoque será de carácter cuantitativo, ya que se requiere un análisis numérico exhaustivo del sistema de vapor, las pérdidas energéticas y los posibles ahorros. A continuación, se detallan las etapas que guiarán el desarrollo de la investigación:

1. Fase de recolección de datos:
 - a) Identificación de las variables clave: En esta etapa se identificarán las variables relevantes para el análisis energético, como el consumo de combustible (bunker), la producción de vapor, las pérdidas de vapor y las emisiones de CO₂, estado del sistema de tuberías, estado de las trampas de vapor, retorno de condensados.
 - b) Levantamiento de información histórica: Se recopilarán datos históricos del consumo de combustible y la producción de vapor de la empresa, utilizando registros de operación y mediciones directas en la planta.
 - c) Medición y monitoreo del sistema de vapor: Se implementarán instrumentos de medición en los puntos críticos del sistema de vapor (calderas, líneas de distribución, puntos de consumo) para obtener datos precisos sobre las pérdidas energéticas y la eficiencia de los equipos, así como instrumentos de medición de combustión como el ENERAC 500 para la determinación de eficiencia de combustión en las calderas.

- d) Definición de datos: Se realizará la tabulación de los datos para determinar la cantidad de energía que se está desperdiciando en el sistema actual de generación y distribución de vapor.
2. Fase de análisis del sistema de vapor:
- a) Cuantificación de pérdidas de vapor: Con base en tabulación se analizará estos resultados y se compararán con las pérdidas energéticas tanto por fugas como por ineficiencia en la operación de los equipos de un sistema que opere en condiciones óptimas. Este análisis incluirá la determinación del porcentaje de vapor desperdiciado en comparación con la producción total, eficiencia de combustión de las calderas, pérdidas de calor por las tuberías y las trampas de vapor. Esta comparación se llevará a cabo utilizando una hoja de cálculo en Excel, donde se calcularán tanto las pérdidas energéticas actuales del sistema como las correspondientes a la implementación de la propuesta de diseño.
 - b) Análisis comparativo de consumo energético: Se comparará el consumo de combustible actual con escenarios potenciales en los que se implementen mejoras, para identificar las posibles áreas de ahorro energético.

3. Fase de desarrollo de propuestas de solución:
 - a) Identificación de alternativas tecnológicas: Se investigarán tecnologías y estrategias para mejorar la eficiencia del sistema de vapor.
 - b) Determinación de oportunidades: Una vez determinado si hay al menos una oportunidad de mejora en el aprovechamiento de la energía en el sistema de generación y consumo de vapor, se presentará una lista de propuestas de mejora sobre el sistema, enfocadas en reducir el consumo de combustible de las calderas. Dicha lista tendrá un orden de prioridad, siendo las más relevantes las que tengan un mayor impacto en el consumo de combustible.
 - c) Evaluación técnica de las propuestas: Cada solución propuesta será evaluada en términos de su viabilidad técnica y el impacto que tendría sobre la eficiencia del sistema de vapor, tomando en cuenta factores como costos de instalación, tiempo de implementación y facilidad de mantenimiento.
4. Fase de análisis económico y financiero:
 - a) Evaluación de la viabilidad económica: Se utilizarán indicadores financieros como el retorno de inversión (ROI), el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR). Esto permitirá justificar la implementación de las mejoras desde un punto de vista financiero.
 - b) Estimación del ahorro económico: Con base en los resultados de los cálculos energéticos, se estimará el ahorro económico que la empresa obtendría por la reducción en el consumo de combustible y los costos asociados a las emisiones de CO₂.

Capítulo II

2.1 Marco teórico

Mediante el marco teórico se busca presentar los principales conceptos utilizados para el desarrollo del análisis energético del sistema de vapor permitiendo así una fácil comprensión de este y una guía sobre verificación de sistemas de vapor.

2.1.1 *El vapor como fluido y forma de energía:*

Según Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2018), “el vapor es el estado gaseoso de una sustancia que normalmente es líquida o sólida en condiciones normales de temperatura y presión. El suministro de un flujo de calor adicional, a presión constante, da lugar a la formación de vapor sin cambios en la temperatura, pero con un aumento considerable en el volumen específico.”. (pág. 91)

Así mismo como un concepto más técnico Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. (2018), “Para una mezcla bifásica líquido–vapor se define como título al cociente entre la masa de vapor presente y la masa total de la mezcla” (pág. 92).

Hoy en día el vapor es implementado como uno de los flujos térmicos más utilizado permitiendo la generación de energía en muchas industrias, desde producciones alimenticias, hasta limpieza de procesos. El vapor puede ser saturado cuando se tiene el líquido a la presión de saturación esto en proporción, o bien vapor sobrecalentado cuando se obtiene posterior a la ebullición del líquido.

2.1.2 *Generadores de vapor*

Un generador de vapor es un equipo térmico utilizado para producir vapor mediante el calentamiento de un fluido, generalmente agua. Esto se logra mediante la combustión de combustible, electricidad o fuentes de energía renovable. Los generadores de vapor son esenciales en aplicaciones industriales y de generación de energía, como las centrales termoeléctricas según lo explica Boyce, M. P. (2012).

2.1.3 *Sistemas de vapor*

De acuerdo con Eastop, T. D., & McConkey, A. (1993);

Un sistema de vapor es un conjunto de componentes diseñados para la generación, distribución, control y uso del vapor como medio energético. Estos sistemas incluyen calderas, tuberías, válvulas, trampas de vapor y otros elementos que permiten su operación eficiente. Los sistemas de vapor son ampliamente utilizados en procesos industriales, calefacción y generación de energía.

Los sistemas de vapor son sistemas complejos que cuentan con diversos componentes de suma importancia que permiten un correcto funcionamiento de este. Dentro de los componentes a mencionar se tiene; componentes de distribución, componentes de medición y componentes de generación, así como equipos extra que se implementan para verla por un correcto funcionamiento. Dentro de los cuales se puede mencionar:

- Generador de vapor como la caldera y sus auxiliares
- Tuberías de vapor.
- Equipos consumidores.
- Motores primarios.
- Equipos de proceso.
- Trampas de vapor.
- Sistemas de condensando.
- Sistemas de alimentación de agua.
- Sistemas de tratamiento de agua.
- Instrumentos de control.

Estos elementos son fundamentales para lograr la finalidad de un sistema de generación que se implementa en múltiples procesos de la industria, desde procesos alimenticios de cocción hasta procesos asépticos. Por lo tanto, el estado de estos es fundamental para lograr una buena eficiencia en un proceso respectivamente.

Calderas:

El Artículo 2º del Reglamento sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Provenientes de Calderas y Hornos de Tipo Indirecto N° 36551-S-MINAET-MTSS describe una caldera como “un recipiente cerrado en el cual, para cualquier fin, excepto el cocimiento doméstico de alimentos, se calienta agua o se genera vapor, generalmente de agua, para ser usado fuera de él, a una presión mayor que la presión atmosférica”.

La generación del vapor se lleva a cabo por la combustión de un combustible sólido, líquido o gaseoso.

A. Tipos de calderas:

Hay principalmente dos tipos de calderas, las calderas pirotubulares y acuotubulares, donde la diferencia entre estos dos tipos es que la caldera pirotubular realiza el recorrido de los gases de combustión internamente por los tubos, mientras que las calderas acuotubulares el agua a calentar circula internamente por los tubos y los gases de combustión pasan externamente por los tubos.

Así mismo las calderas se clasifican de acuerdo con el Reglamento sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Provenientes de Calderas y Hornos de Tipo Indirecto N° 36551-S-MINAET-MTSS por su capacidad de producción de vapor como se puede observar en la ilustración 2, denominada como clasificación de calderas por producción de vapor.

Ilustración 2

Clasificación de calderas por producción de vapor

Tabla No. 1
Clasificación de Calderas

Categoría	Generación de vapor (M = kg vapor/hr)	Área de transferencia (A = m ²)	Potencia térmica (P = kW)
A	7500 ≤ M	223 ≤ A	4700 ≤ P
B	2000 ≤ M < 7500	60 ≤ A < 223	1253 ≤ P < 4700
C	250 ≤ M < 2000	7 ≤ A < 60	157 ≤ P < 1253
D	M < 250	A < 7	P < 157

Nota. Recuperado de: Reglamento sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Provenientes de Calderas y Hornos de Tipo Indirecto N° 36551-S-MINAET-MTSS

Dentro del funcionamiento de las calderas se cuenta con tres principales factores de análisis para un correcto funcionamiento de esta, además de la parte mecánica de esta dentro de los cuales se puede mencionar:

B. Combustión:

La combustión es uno de los procesos que se dan en las calderas para generar el vapor, según Chang & Goldsby (2016) se puede definir como;

“Un proceso químico en el cual una sustancia reacciona con el oxígeno, liberando energía en forma de calor y luz. Este calor y luz son los encargados de llevar el agua a su estado de saturación en conjunto con la presión y generando el vapor que es implementado para los procesos.”

Para una combustión correcta los sistemas de calderas deben controlar la estequiometría de combustión para llegar a un balance que permita una eficiencia de combustión correcta. La eficiencia de combustión la define Smith et al (2015) como “la capacidad de un sistema para convertir el combustible en energía útil, minimizando las pérdidas de calor y emisiones no deseadas durante el proceso”.

5. Analizador de Eficiencia de combustión:

Son equipos que analizan los parámetros de la combustión; siempre analizan Humos Secos, ya que en caso contrario la humedad de los humos podría estropear los mecanismos interiores de los analizadores; por ello en primer lugar “secan” los humos pasándolos por un filtro. Incorporan:

1. Medidor de O₂, resultado en %
2. Medidor de CO, indicación en ppm.
3. Temperatura Ambiente (°C).
4. Temperatura de Humos (°C).
5. Medición de tiro (Pa, mmCA, mbar, etc).

Con la medición de O₂, indicando previamente el combustible que se está analizando, el aparato calcula el exceso de aire y el CO₂ correspondiente, con todos estos datos proporciona el rendimiento de la combustión.

Las mediciones realizadas directamente por el analizador son válidas sea cual sea el combustible; sin embargo, los datos de exceso de aire CO₂ y rendimiento, al ser calculados

por el equipo, dependen de que al mismo se la haya indicado correctamente dicho combustible.

A. Enerac modelo 500:

El analizador de gases ENERAC™ 500 es perfecto tanto para determinar la eficiencia de una fuente de combustión como para recopilar datos avanzados de emisiones para uso interno o para los requisitos de informes de emisiones locales, estatales y federales (un analizador de combustión portátil de nivel de cumplimiento).

B. Eficiencia de una caldera:

La eficiencia de una caldera se define “como la relación entre la cantidad de energía útil generada por el sistema y la energía suministrada en forma de combustible, lo que permite evaluar el rendimiento del equipo térmico” (Moran et al., 2014).

C. Consumo energético:

El consumo energético se refiere a la “cantidad de energía utilizada por un sistema, equipo o proceso para realizar una tarea específica, y es un indicador clave del desempeño energético en diversos entornos industriales y domésticos” (Moran et al., 2014).

2.1.4 Tuberías, aislamiento de tuberías y accesorios

Durante el proceso de generación de vapor el traslado de este es fundamental, este se desarrolla a partir de un diseño de tuberías y diversos accesorios que permiten el trasiego del vapor a los consumidores respectivamente.

El diseño de tuberías en un sistema de vapor implica la planificación y selección de materiales, dimensiones y configuraciones que permitan el transporte eficiente, seguro y continuo del vapor, minimizando las pérdidas de energía y garantizando el cumplimiento de las normas técnicas de acuerdo con (Botros, 2006).

➤ Aislamiento de tuberías y accesorios

Las tuberías y accesorios al ser una parte fundamental del proceso de generación de vapor, así como de su transporte, debido a esto, es requerido que estos diseños contemplen un aislamiento que permita la disminución de la pérdida de energía, así como disminuir la temperatura en el ambiente de trabajo e incluso evitar accidentes como quemaduras del personal que trabaje por la zona.

2.1.5 Disipación de calor en tuberías sin aislamiento

Un diseño de una instalación debe contemplar aspectos fundamentales como lo es un correcto aislamiento, para poder determinar la energía perdida en caso de no contar con este aislamiento se puede determinar de acuerdo con (Junta de castilla y León, 2010)

$$q = \frac{\pi(T_f - T_a)}{\frac{1}{\alpha_i * D_{int}} + \frac{1}{2 * \lambda_p} * \ln\left(\frac{D_{ais}}{D_{ext}}\right) + \frac{1}{\alpha_e * D_{ais}}}$$

Ecuación 1. Cálculo del flujo de calor tuberías aisladas (Junta de castilla y León, 2010)

Donde:

q = Densidad de flujo de calor, W/m.

λ_p = Conductividad térmica de la pared del tubo, W/m K.

λ_{ais} = Conductividad térmica del aislante, W/m K.

α_i = Coeficiente de transferencia de calor en el interior de la tubería, W/m² K.

α_e = Coeficiente de transferencia de calor en el exterior de la tubería W/m² K.

D_{ext} = Diámetro exterior del tubo, m.

D_{int} = Diámetros interior del tubo, m.

D_{ais} = Diámetro exterior del aislamiento, m.

$D_{ais} = D_{ext} + E_{ais}$.

E_{ais} = Espesor del aislamiento, m.

T_f = Temperatura del fluido de trabajo, °C

T_a = Temperatura ambiente °C

Así mismo es requerido el cálculo del coeficiente de transferencia de calor en el exterior de la tubería (α_e), todo esto se explica por medio de la siguiente ecuación:

$$\alpha_e = \alpha_{conv} + \alpha_{rad}$$

Ecuación 2. Coeficiente de transferencia de calor en el exterior de la tubería

Donde:

α_{conv} = Coeficiente de transferencia de calor por convección, W/m²K.

$$\alpha_{rad} = \text{Coeficiente de transferencia de calor por radiación, } \frac{W}{m^2}$$

Además, se calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección (α_{conv}), por medio de la siguiente ecuación:

$$\alpha_{conv} = \frac{Nuf * \lambda_f}{D_{ais}}$$

Ecuación 3. Coeficiencia de transferencia de calor por convección

Donde:

$\lambda_f = \text{Conductividad térmica del aire a temperatura}$

$Nuff = \text{Numero de Nusselt}$

El número de Nusselt es un parámetro adimensional que describe la relación entre la transferencia de calor por convección y la transferencia de calor por conducción en un fluido, siendo fundamental para el análisis de fenómenos de transferencia térmica según Cengel & Ghajar, (2015). Por lo que es una relación con el número de Reynolds, por lo que se obtiene de la siguiente:

*Si $10 \leq Ref \leq 1 \times 10^3$ entonces $Nuf = 0.44 * Ref$*

*Si $1 \times 10^3 \leq Ref \leq 2 \times 10^5$ entonces $Nuf = 0.22 * Ref$*

Cuando se hace referencia de Ref o del número de Reynolds se puede definir como un parámetro adimensional que caracteriza el régimen de flujo de un fluido, representando la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas; es clave para determinar si el flujo es laminar o turbulento (Cengel & Cimbala, 2014).

Se calcula el número de Reynolds

$$Ref = \frac{V_f * D_{ais}}{\nu}$$

Ecuación 4. Número de Reynolds

Donde:

$V_f = \text{Velocidad del aire exterior, m/s.}$

$V = \text{viscosidad cinemática del aire a temperatura ambiente, m}^2/\text{s.}$

Se procede a calcular el coeficiente de transferencia de calor por radiación, utilizando la siguiente ecuación:

$$\alpha_{rad} = Q * \epsilon_{sup} * ((T_{sup})^4 - (T_a)^4)$$

Ecuación 5. Coeficiente de transferencia de calor por radiación

Donde:

$Q = \text{Constante de Stefan – Boltzmann} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 * \text{K}^4.$

$\epsilon_{sup} = \text{Emisidad de la pared del tubo.}$

$T_{sup} = \text{Temperatura superficial (K).}$

$T_a = \text{Temperatura ambiente (K).}$

La implementación de las ecuaciones previamente mencionadas permite realizar un cálculo más preciso, facilitando el diseño óptimo del sistema. Esto, a su vez, contribuye a una disminución significativa de las pérdidas de calor, lo que mejora la eficiencia general del sistema.

2.1.6 Recuperación de condensados

“Un sistema de retorno de condensados es un conjunto de componentes diseñados para recolectar, transportar y reutilizar el condensado generado en un sistema de vapor, lo que mejora la eficiencia energética y reduce el consumo de agua y combustible” (Moran et al., 2014).

De acuerdo con lo que explica Moran (2014);

Es de fundamental importancia la implementación de un sistema de recuperación de condensados ya que este tipo de sistemas permiten importantes ahorros y mejoras del sistema de generación de vapor en general. Por tanto, la no recuperación de condensados significa pérdidas importantes, como lo es un mayor gasto en combustible por calentar de 0 el agua de alimentación, pérdida es agua de alimentación, pérdida en tratamiento de esta agua, entre otros aspectos.

El cálculo de pérdida por no recuperación de retorno de condensado se puede obtener con base en la siguiente ecuación:

$$Q_t = 3600 \cdot Q_{cond} \cdot (hf_{conf} - hf_{bfm}) \cdot t \cdot n$$

Ecuación 6. Cálculo de la pérdida por no recuperación de condensado. (Armstrong Internacional, Inc., 1998)

Donde:

$$Q_t = \text{calor perdido kJ/año.}$$

$$Q_{cond} = \text{Flujo de condensados nos retornados, kg/s.}$$

$$hf_{cond} = \text{Entalpía de líquido saturado a la temperatura de los condensados, kJ/kg.}$$

$$hf_{conf} = \text{Entalpía de líquido saturado a temperatura ambiente, kJ/kg.}$$

$$t = \text{tiempo de operación, h/año.}$$

$$n = \text{Eficiencia térmica de la caldera}$$

2.1.7 Pérdidas energéticas por trampas de vapor defectuosas

“Una trampa de vapor es un dispositivo diseñado para eliminar el condensado, el aire y otros gases no condensables de un sistema de vapor, permitiendo que el vapor puro fluya hacia los equipos de proceso, mejorando la eficiencia y evitando daños en los componentes del sistema” (Spirax Sarco, 2014).

Las trampas de vapor son instrumentos de suma importancia porque permiten una disminución en el mantenimiento de los equipos, al eliminar condensado que no es necesario en el proceso y que incluso puede llegar a ser perjudicial. Un buen sistema de trampas de vapor reflejará una mejor calidad en el vapor producido por el sistema.

Así mismo contar con trampas de vapor que se encuentren defectuosas o bien dañadas generan importantes pérdidas de energía. Para calcular la pérdida de energía debido a fugas a través de orificios en trampas de vapor, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Fuga de vapor (kg/h)} = A^2 \times B \times C$$

Donde:

- A es el diámetro del orificio en milímetros (mm).
- B es una constante con un valor de 0.4.
- C es la presión absoluta del vapor en bares (bar).

Esta ecuación permite estimar la cantidad de vapor que se pierde debido a fugas en las trampas de vapor, lo cual es esencial para evaluar la eficiencia del sistema y los costos asociados, esto de acuerdo con (TLV, n.d.)

2.1.8 Sistemas de alimentación de agua y tratamiento de estas

El sistema de generación de vapor requiere una alimentación de agua, en este caso esta agua que es utilizada en una caldera debe ser tratada para evitar problemas como incrustaciones, corrosión o formación de espuma, los cuales pueden reducir la eficiencia y dañar el equipo.

El sistema de alimentación de agua a una caldera consta de componentes como un tanque de almacenamiento, bombas de alimentación y, en algunos casos, un economizador, que optimiza la eficiencia energética precalentando el agua antes de su entrada a la caldera. Además, el agua debe ser tratada químicamente para evitar problemas como incrustaciones, corrosión y formación de espuma. Entre los productos químicos utilizados se encuentran desaireadores, ablandadores, antiespumantes, fosfatos y controladores de pH, que aseguran el correcto funcionamiento y prolongan la vida útil del equipo (Moran et al., 2014).

El sistema de alimentación y el tratamiento del agua aseguran que la caldera funcione de manera eficiente, segura y duradera. Sin un tratamiento adecuado, pueden ocurrir fallos graves en el sistema debido a la acumulación de minerales, corrosión o formación de espuma. Estos procesos combinados también contribuyen a reducir el consumo de energía y a minimizar los costos operativos.

2.1.9 ISO 50001

Muchas industrias, en específico la del sector alimenticio deben cumplir con normativas que regulan la producción de alimentos y bebidas, así mismo existen otras entidades que lo que permiten es certificar la calidad tanto del producto, como otros aspectos de importancia como lo es el impacto al medio ambiente, entre otros aspectos que genera una mejor imagen de la empresa con los consumidores.

Actualmente la empresa, cuenta con varias certificaciones como lo es Rain Forest Alliance (RFA), Carbono Inventario, ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 y la ISO 5001: 2018 que busca principalmente estándares para reducción del consumo energético e impacto ambiental.

La ISO 50001 es un estándar internacional que proporciona un marco para establecer, implementar y mejorar sistemas de gestión de energía. Su objetivo es ayudar a las organizaciones a reducir el consumo energético, mejorar la eficiencia y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante un enfoque sistemático y continuo (ISO, 2018).

Esta ISO cuenta con una estructura basada en el Ciclo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar) la cual se explica a continuación:

- Planificar: Establecer objetivos y metas energéticas basadas en un análisis de la situación energética actual.
- Hacer: Implementar planes de acción para mejorar el desempeño energético.
- Verificar: Supervisar, medir y analizar los resultados obtenidos.
- Actuar: Tomar medidas para corregir desviaciones y mejorar continuamente el sistema.

Además, cuenta con algunos requisitos como lo es la política energética que busca desarrollar y documentar un compromiso para mejorar el desempeño energético. Como segundo requisito se tiene la revisión energética la cual requiere identificar los usos significativos de energía (USE) y oportunidades de mejora, también se puede mencionar los

indicadores de desempeño energético (EnPI) que permite establecer métricas claras para medir avances.

Como tercer requisito es plantear objetivos y metas energéticas basadas en los resultados de la revisión energética, y, por último, pero no menos importante un plan de acción energético para implementar actividades específicas que permitan cumplir los objetivos definidos.

Implementar la ISO 50001:2018 brinda varios beneficios como los siguientes:

- Reducción de costos: Menor consumo energético debido a mejoras en la eficiencia.
- Sostenibilidad: Disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Cumplimiento normativo: Alineación con regulaciones locales e internacionales relacionadas con la energía.
- Ventaja competitiva: Mejora la reputación de la organización y su compromiso con la sostenibilidad.

Capítulo III

3.1 Análisis de datos recolectados

3.1.1 Variables correspondientes a la generación de vapor:

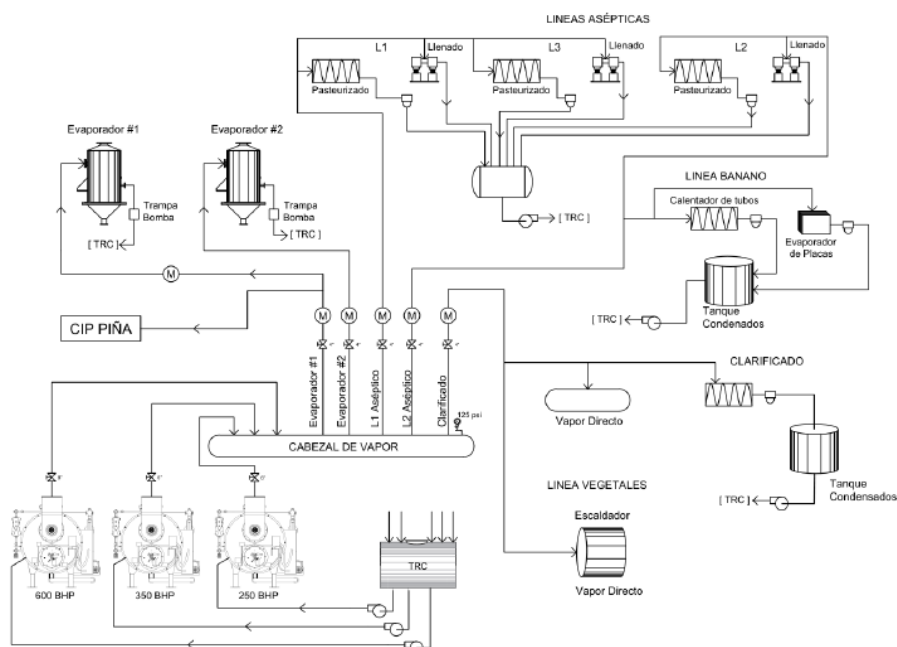
Para el desarrollo del análisis energético, se toman datos históricos de la empresa con el fin de determinar los principales indicadores de generación de vapor y producción respectivamente como los siguientes:

➤ Balance energético:

Para un mejor entendimiento en la ilustración 3 se representa el sistema de generación de vapor de la planta. En esta se puede observar que el sistema cuenta con tres calderas, una caldera de 600BHP, una caldera de 350BHP y una de 250BHP, un manifold o sistema de distribución del vapor, dos evaporadores, tres líneas de aséptico, un sistema de clarificado, la línea de banano la cual cabe destacar que esta es la parte de pelado de la fruta por parte de los trabajadores.

Ilustración 3

Representación Red de Vapor y Retorno de Condensados



Nota. Elaboración propia

Tabla 4*Balance energético del vapor*

Balance energético del vapor		
Sistema	Consumo de vapor (kg vapor / mes)	%
Consumo de vapor	325 728 143	100%
Evaporador 2	633 505,71	19%
Evaporador 1	756 914,41	23%
Aséptico 1 y 3	859 874,49	26%
Piña	83 378,71	3%
Navatta	347 643,49	11%
Clarificado	576 876,56	18%
Subtotal	3257283,17	52%
Pérdidas	574933,68	15%
Total producido	3832216,85	100%
Consumo de Bunker	110 589,75	
Error	7,05%	

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 3 se muestra el resumen del balance del consumo de vapor, en el cual se observa la distribución del vapor a cada uno de los puntos de consumo. Este consumo de vapor para cada uno de los medidores se obtiene a partir de los registros diarios, realizando una diferencia entre el valor inicial y el valor final para cada mes, a partir del registro desde la semana 17 hasta la semana 40.

Se observa que el principal consumidor de vapor es la línea de aséptico 1 y 3, el cual tiene un consumo del 26% del vapor generado 859 804.86 kg de vapor/mes (1 895 923.20 lb vapor/mes). Posteriormente tenemos los evaporadores 1 y 2, los cuales consumen el 23 % 756 668.64 kg de vapor/mes (1 668 360 lb vapor/mes) y el 19% 633 331.99 kg de vapor/mes (1 396 045.60 lb vapor/mes) respectivamente. La línea de clarificado consume el 18% 576 926.35 kg de vapor/mes (1 271 720 lb vapor/mes), la línea de Navatta un 11% 347 768.13 kg de vapor/mes (766 468 lb vapor/mes), y finalmente la línea Piña consume el 3% restante 83 351.94 kg de vapor/mes (183 804 lb vapor/mes).

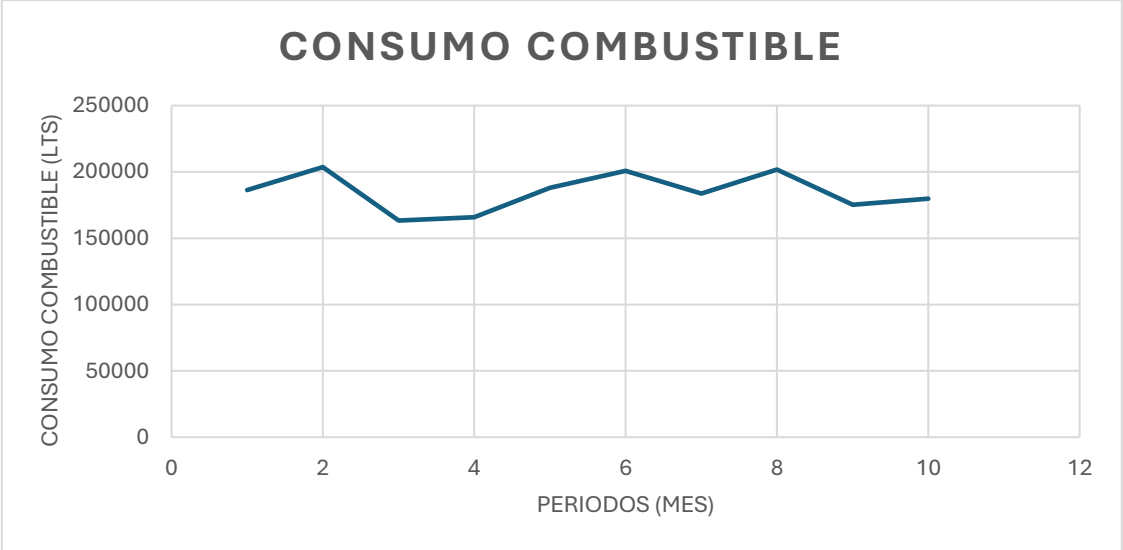
La comparación del consumo de vapor para el balance de energía se hace a partir del consumo de bunker necesario para generar ese vapor, teniendo en consideración la eficiencia de las calderas. El resultado de la estimación del bunker requerido se compara con el promedio de la facturación de bunker mensual.

➤ **Consumo de combustibles:**

Durante el periodo 2024 se tomaron los datos del consumo de combustible por cada mes, el corte de la información se realizó el mes de octubre como se representa en el gráfico 2, además se puede observar la relación directa con respecto a la producción que hubo durante el mismo periodo esto en el gráfico 3. La finalidad del análisis del combustible es obtener una línea base que nos indique como puede reducirse el consumo de este manteniendo la misma producción, al aplicar mejoras en el sistema.

Gráfico 2

Consumo de litros de combustible bunker por mes por el sistema de calderas del año 2024



Nota. Elaboración propia

En el gráfico 3, se puede observar como la gráfica muestra la relación entre el consumo de combustible (en litros) y la producción (en toneladas) a lo largo de los meses del año. Dentro de los puntos clave se puede mencionar una disminución en ambos valores

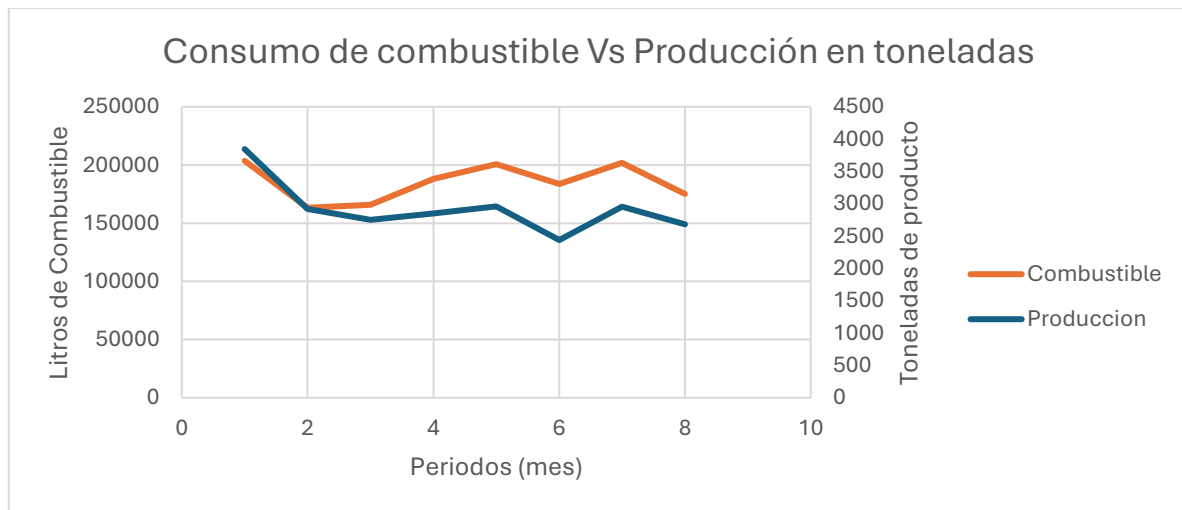
después del primer mes, seguida de una estabilización y fluctuaciones en los meses siguientes.

La producción parece tener una tendencia similar al consumo de combustible, lo que sugiere una correlación entre ambos, en los primeros meses, el consumo de combustible es alto, pero baja significativamente en el segundo mes, por su parte la producción también disminuye, aunque no en la misma proporción.

En los meses intermedios, la producción parece mantenerse relativamente estable mientras que el consumo de combustible muestra ciertas variaciones. La gráfica muestra una relación estrecha entre el consumo de combustible y la producción. Sin embargo, hay momentos donde el consumo no parece traducirse directamente en un aumento de producción, lo que podría ser un área de oportunidad para mejorar la eficiencia energética.

Gráfico 3

Combustible vs producción en toneladas



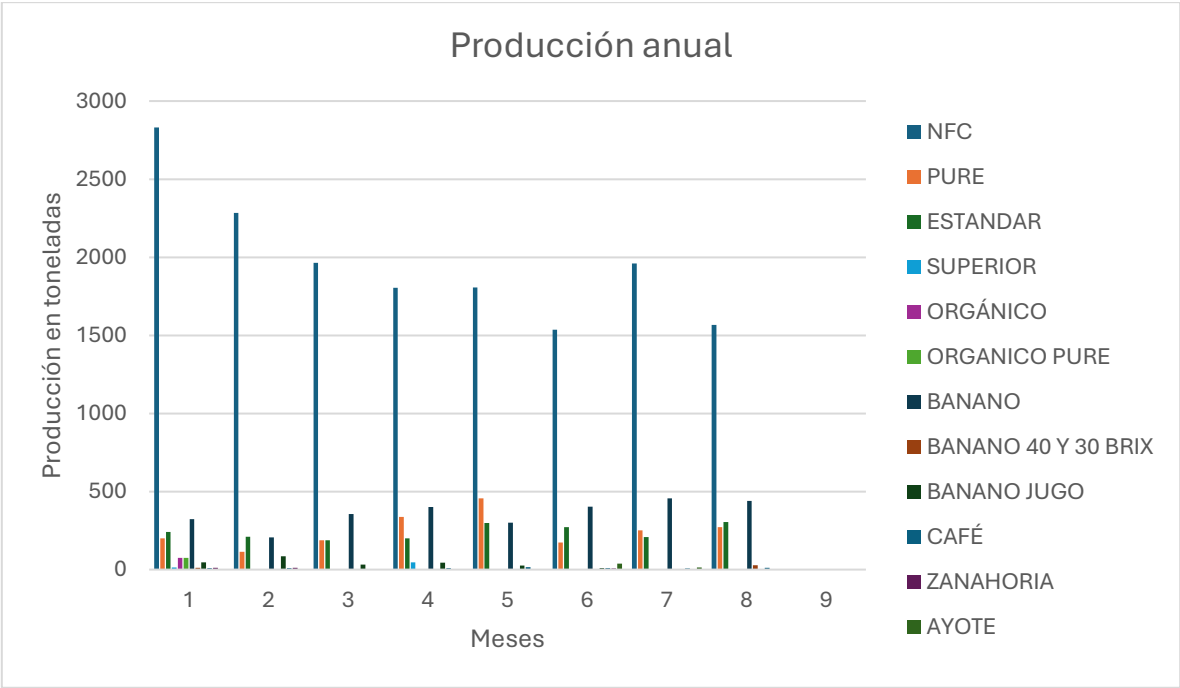
Nota. Elaboración propia

Así mismo en el gráfico, se hace una proyección en donde se explica un poco el comportamiento de la producción como tal de acuerdo con las toneladas de producto y como el principal producto producido es el NFC, el cual se puede explicar como “Not From

Concentrate”, que se utiliza para describir zumos y frutas que no se concentran o reducen y son implementadas para la elaboración de diversos alimentos como lo pueden ser postres.

Gráfico 4

Producción en toneladas de los diferentes productos que distribuye la empresa



Nota. Elaboración propia

➤ ***Factura de combustible mensual por tonelada de producción:***

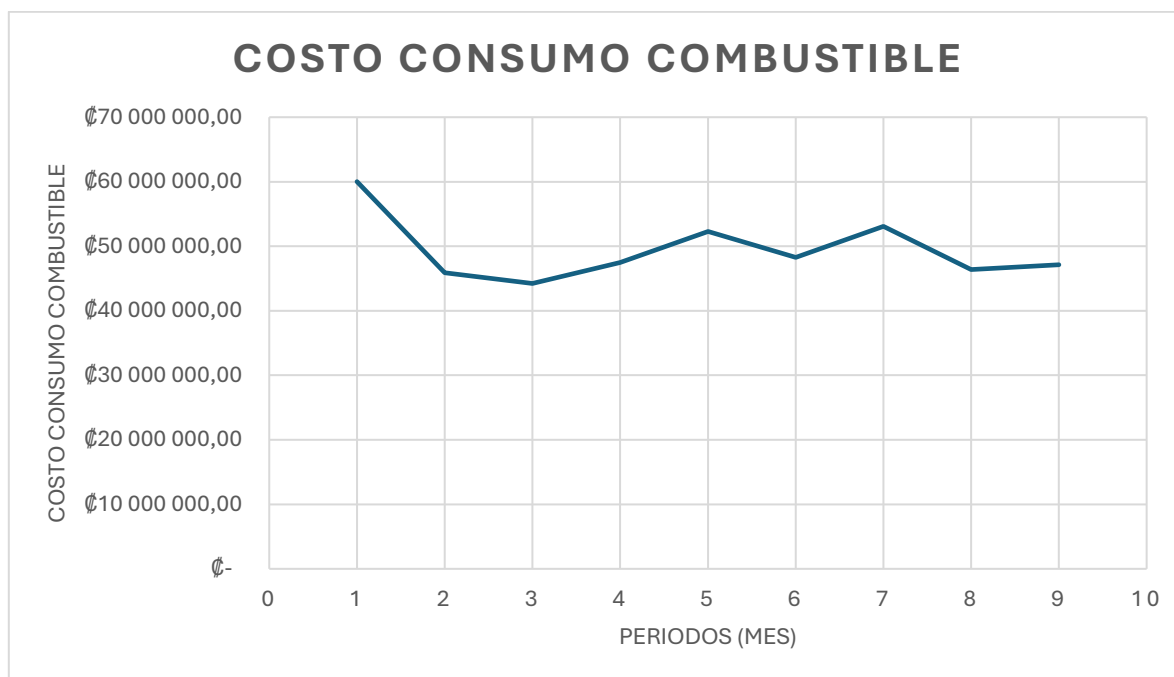
Dentro del análisis de la tendencia del consumo de combustible un aspecto principal es el costo de este, a pesar de ser un aspecto variable que depende del tipo de cambio del dólar respecto al colón y de la situación del país, se puede inferir como primer aspecto que se muestra el costo del consumo de combustible a lo largo de los meses y con ello una disminución inicial del costo entre el primer y el tercer mes.

Así mismo a partir del tercer mes, el costo comienza a incrementarse gradualmente con algunas fluctuaciones, en el mes siete, se presenta un pico en el costo, seguido de una leve disminución en el mes ocho y una estabilización en el mes nueve. La tendencia sugiere que, aunque al principio se logró una disminución en los costos, posteriormente se han mantenido en un rango elevado, posiblemente debido a un incremento en el consumo o a variaciones en el precio del combustible.

Para optimizar los costos, sería recomendable analizar la eficiencia en el uso del combustible, identificar posibles desperdicios y evaluar estrategias para estabilizar el consumo y reducir costos operativos. Todo esto se ve representado en el grafico 5 a continuación:

Gráfico 5

Costo de Consumo de combustible en colones



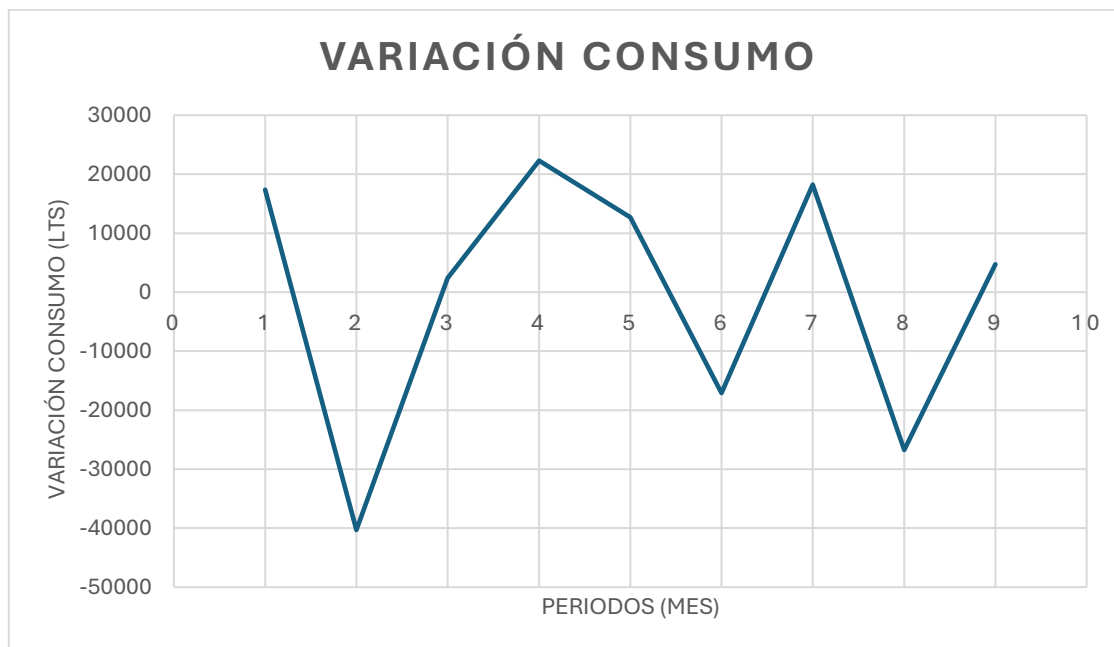
Nota. Elaboración propia

También se realizó el análisis de la variación de consumo como se representa en el gráfico 6, esto respecto al mes anterior, donde se representa los cambios en la cantidad de combustible consumido mes a mes y se observan fuertes fluctuaciones en la variación del consumo, por ejemplo, en el mes 2, hay una caída significativa en el consumo de combustible (más de -40,000 litros).

- En el mes 4, hay un aumento notable en el consumo (más de 20,000 litros).
- Se observan patrones cíclicos, con aumentos y reducciones bruscas en el consumo en diferentes periodos.
- En los meses 6 y 8, hay nuevamente caídas pronunciadas, lo que podría indicar ajustes operativos, mantenimientos o cambios en la demanda de producción.

Gráfico 6

Variación de Consumo de combustible bunker por mes



Nota. Elaboración propia

La gráfica muestra fluctuaciones significativas en el consumo de combustible, con periodos de aumentos y reducciones bruscas. Esto indica una posible variabilidad en la demanda de producción, ajustes operativos, mantenimientos o cambios en la eficiencia del sistema de calderas.

3.1.2 Generación de vapor

Como primer aspecto se procede con el análisis de los componentes del sistema de generación de vapor, esto a partir de diversas tablas como la siguiente:

Tabla 5*Datos caldera 600BHP*

Datos Caldera 600 BHP	
Datos	Valores
Marca	Cleaver Brooks
Categoría	A
Fluido	Vapor Saturado
Potencia	600 BHP
Tipo de caldera	pirotubular
Combustible	BUNKER
Año de fabricación	1990
Presión regulada - Valv.1(kPa)	1006 kPa
Presión regulada - Valv.2(kPa)	1020 kPa
N de Serie o fabrica	L-88195
Año de instalación	2008
Presión de trabajo (kPa)	930kPa
Presión máxima de trabajo (kPA)	1034kPa
Capacidad (Kg/h)	9390kg/h
Economizador	No
Tiempo de operación	4 pasos
Temperatura de gases de chimenea	24 h
Generación de Vapor	Sí

Nota. Elaboración propia

Ilustración 4

Representación Caldera 600 BHP



Nota. Elaboración propia

En tabla 4, se hace referencia a los datos principales de la caldera de 600BHP, es una caldera Cleaver Brooks, es un equipo igneotubular de 600 BHP diseñado para la generación de vapor saturado, utilizando bunker como combustible. Su año de fabricación es 1990, y fue instalada en 2008. Cuenta con una presión de trabajo de 930 kPa, con un límite máximo de 1034 kPa. Además, posee dos válvulas de regulación de presión configuradas en 1006 kPa y 1020 kPa, respectivamente.

Su capacidad de generación de vapor es de 9390 kg/h, y está equipada con un economizador, lo que mejora su eficiencia térmica. La caldera opera con un ciclo de 4 pasos, asegurando una combustión eficiente y una adecuada transferencia de calor.

La temperatura de los gases de chimenea es monitoreada las 24 horas, lo que permite un control continuo del rendimiento y emisiones. Su número de serie es L-88195. Además, se le implementó un sistema para la automatización del sistema de combustión Siemens modelo LMVS2, este se observa representando en la Ilustración 4.

Tabla 6

Datos Caldera 350BHP

Datos Caldera 350 BHP	
Datos	Valores
Marca	Cleaver Brooks
Categoría	A
Fluido	Vapor Saturado
Potencia	350 BHP
Tipo de caldera	Pirotubular
Combustible	BUNKER
Presión de trabajo (kPa)	930kPa
Presión máxima de trabajo (kPA)	1034kPa
Capacidad (Kg/h)	5477 kg/h
Economizador	No
Tiempo de operación	4 pasos
Temperatura de gases de chimenea	24 h
Generación de Vapor	Sí

Nota. Elaboración propia

Tabla 7*Datos caldera 250BHP*

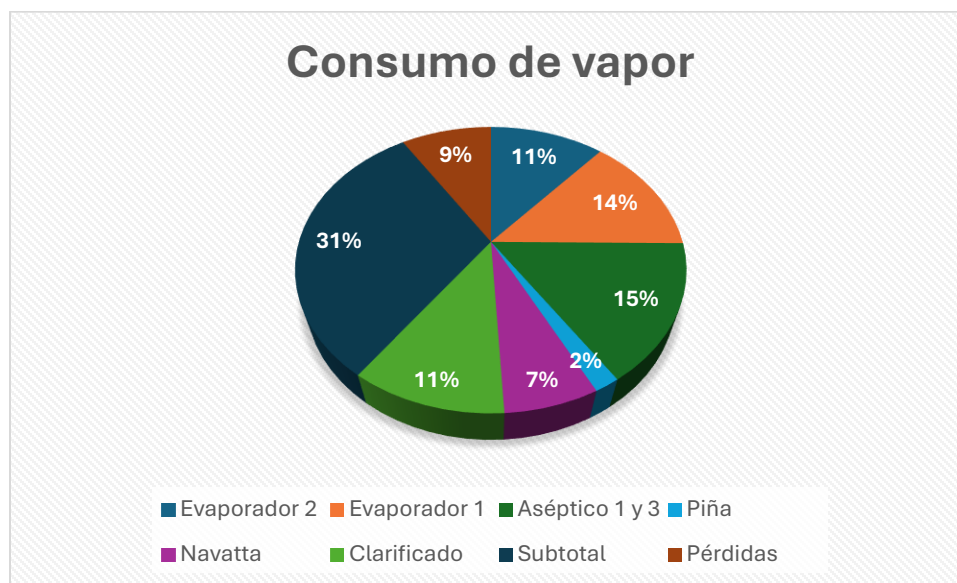
Datos Caldera 250 BHP	
Datos	Valores
Marca	Cleaver Brooks
Categoría	A
Fluido	Vapor Saturado
Potencia	250 BHP
Tipo de caldera	Pirotubular
Combustible	BUNKER
Presión de trabajo (kPa)	930kPa
Presión máxima de trabajo (kPA)	1034 kPa
Capacidad (Kg/h)	3,912.5 kg/h
Economizador	No
Tiempo de operación	4 pasos
Temperatura de gases de chimenea	24 h
Generación de Vapor	Sí

Nota. Elaboración propia

3.1.3 Distribución de vapor

Gráfico 7

Representación Consumo de vapor por equipo consumidor de vapor



Nota. Elaboración propia

En el gráfico 7 se representa el consumo de vapor, el gráfico ayuda a visualizar cómo se distribuye el consumo de vapor en los distintos procesos y equipos y ayuda a identificar distintas oportunidades de optimización en los procesos de mayor consumo o en la reducción de pérdidas.

Se puede observar cómo los evaporadores son los mayores consumidores de vapor, lo que es esperable en procesos donde se concentra un producto líquido como los es el NFC. Como segundo aspecto se infiere que el clarificado y los sistemas asépticos también tienen un consumo significativo, indicando su relevancia en el proceso.

Además, se refleja una vez más la existencia de pérdidas considerables de vapor, lo que sugiere una posible oportunidad de optimización para reducir el desperdicio. Por lo tanto, el proceder con la optimización de la distribución de vapor podría mejorar la eficiencia energética y reducir costos de operación.

3.1.4 Aislamiento de tuberías

Durante el desarrollo del análisis del estado actual del sistema, se detectaron tramos de tubería sin aislamiento en áreas de proceso, específicamente en la alimentación de vapor de las líneas asépticas # 1 y # 3, así como en clarificado. En la ilustración 5, se puede observar un ejemplo de la situación actual de la tubería sin aislamiento respectivamente la cual se ve de color negro, esta es un tramo pequeño de alrededor de 11.23m ya que es la entrada de los sistemas, en la parte de atrás de la ilustración lo que se puede ver son algunos sistemas de transferencia de calor que también son implementados en el proceso.

Ilustración 5

Tubería de vapor sin aislamiento en área de clarificado

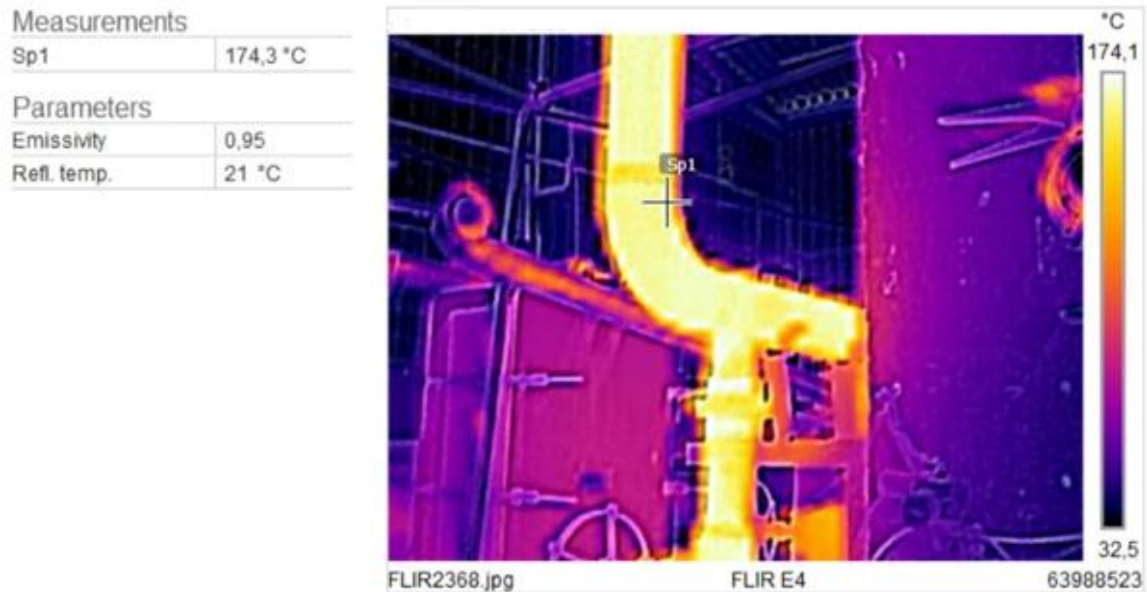


Nota. Elaboración propia

Para el cálculo de la energía perdida actualmente, se realizaron capturas termográficas en las tuberías, lo que arrojó una temperatura de 174 °C. Esta representación termográfica se puede observar en la Ilustración 6.

Ilustración 6

Representación termográfica líneas asépticas



Nota. Elaboración propia

Con esta información, los diámetros de tubería y las distancias, se utilizaron las ecuaciones mostradas a continuación para determinar el ahorro según corresponde.

Calor perdido en tuberías sin aislamiento:

$$Q_{sa} \left[\frac{BTU}{hr * pie^2} \right] = 0.174 * \epsilon \left\{ \left(\frac{T_s + 460}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 460}{100} \right)^4 \right\} + 0.296 * \sqrt[4]{(T_s - T_a)^5} * \sqrt{\frac{(v + 68.9)}{68.9}}$$

Los datos implementados son los siguientes:

ϵ : emitencia tubo hierro 0.94

T_s : temp Superficial tubería 174 °C / 345.2°F

T_a : Temp Ambiente 25°C / 77°F

V : Velocidad del viento 0 ft/min

$$Q_{sa} = 872.79 BTU / hft^2$$

De esto se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Tabla 7 calor perdido en tuberías sin aislamiento.

Tabla 8

Calor perdido en tuberías sin aislamiento tuberías aséptico y clarificado

Tramo	Longitud m	equivalente ft	tubería Diámetro Nominal in	Diámetro exterior in	Longitud tubería ft ² /ft	Calor perdido BTU/h
Asépticos	8.73	28.64	3.00	3.50	0.9163	22 904.7
Clarificado	2.50	8.20	3.00	3.50	0.9163	6 559.48
					Total	29 464.1

Nota. Elaboración propia

Con el fin de obtener una comparación que permita respaldar la importancia de implementar el aislamiento se realiza el cálculo de calor perdido con tuberías con aislamiento:

$$Q_{CA} \left[\frac{BTU}{hr * ft^2} \right] = \frac{(T_i - T_a)}{\left\{ \left(\frac{r_s}{k} \right) * \ln \left(\frac{r_s}{r_i} \right) + \frac{1}{f} \right\}}$$

Los datos implementados son los siguientes:

T_a: temp ambiente 25°C / 77°F

T_i: Temp sueprficial del tubo 174°C / 345.2°F

R_s: radio exterior / R_i: radio exterior del tubo/R_s: R_i + e

K: conductividad termica cañuela fibra de vidrio 0.399 BTU in/hft²°F

f: coeficiente conductividad de pelicula para tubería 1.65 BTU/h ft²°F

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 8 de cálculo de pérdidas de aislamiento:

Tabla 9

Cálculo pérdidas con Aislamiento tuberías aséptico y clarificado

Tramo	Diámetro Externo in	Espesor aislamiento in	Radio aislamiento ft ² /ft	Qca BTU/h	Área con aislamiento ft ² /ft	Calor perdido BTU/h
Asépticos	3.00	2.00	3.75	34.48	1.96	1 939.09
Clarificado	3.00	2.00	3.75	34.48	1.96	555.32
Total						2 494.42

Nota. Elaboración propia

Se puede observar una diferencia de 26 969.68 BTU/H en calor perdido debido a la no implementación de aislante en estos tramos. En otras palabras, se puede explicar el ahorro que se puede obtener a partir de una comparación del calor perdido en MBTU/año con respecto al combustible que se consume con o sin el aislamiento respectivo como se ve en la tabla 9.

Tabla 10

Posible ahorro obtenido por aislamiento de tubería tuberías aséptico y clarificado

	Sin aislamiento	Con aislamiento	Ahorro	Unidades
Energía	194 463	16 463	178 000	MBTU / año
Búnker	6040	511	5 529	Litros / años

Nota. Elaboración propia

Al realizar el análisis de los datos obtenidos se desarrolló la tabla 10, en donde se explican los ahorros obtenidos y resultados financieros, esto a partir de la identificación y descripción del problema, el cual se observa en el área de producción la presencia de tuberías de vapor sin aislamiento térmico. Las tuberías para analizar son las tuberías de la línea aséptica sin aislamiento que son alrededor de medio metro más sus accesorios que cuentan con un diámetro de 3 pulgadas, además de la línea de clarificado de las tuberías de

intercambiador de tubos de 2.5 metros de 3 pulgadas de diámetro, ambos tramos sin aislamiento.

Esta situación genera pérdidas de energía térmica que resultan en un consumo innecesario de combustible (búnker). Para abordar este problema, se propone la implementación de un sistema de aislamiento en dichas tuberías. El objetivo principal es reducir las pérdidas energéticas y, en consecuencia, disminuir el consumo de combustible y los costos operativos.

Para determinar el ahorro se implementaron las siguientes constantes:

- Horas de operación: 6600h/año
- PCS búnker: 18300 BTU/lbm
- Eficiencia caldera 84%
- Densidad búnker 2.0944lbm/litro

Tabla 11

Aislamiento de tubería- oportunidad de mejora aislamiento de tuberías aséptico y clarificado

AISLAMIENTO DE TUBERÍAS DE VAPOR ASÉPTICO Y CLARIFICADO			
Electricidad	Búnker	Sistema	Agua
No	Sí	Vapor	No

Descripción: Se detectan tuberías de vapor sin aislamiento en el área de proceso.

Se propone aislarlas para reducir la pérdida de energía térmica y ahorrar combustible.

Resumen de Resultados

	Ahorros Obtenidos	
Energía	Ahorro energético	Ahorro económico
Eléctrica	0,0kWh/año	\$0.0 /año
Búnker	3 686 litros /año	\$1 555 litros /8 meses
Total		\$1 555 litros /8 meses
Mitigación de emisiones CO2		9874 kg /año

Costos de Implementación			
Compra de equipos y materiales		\$152,6	US\$
Mano de obra		\$138,5	US\$
Otros		\$0	US\$
Subtotal		\$291	US\$
Ingeniería	0%	\$0	US\$
Inspección	0%	\$0	US\$
Imprevistos	10%	\$29,1	US\$
Total		\$320,1	US\$

Nota. Elaboración propia

La implementación del aislamiento de tuberías genera ahorros significativos en el consumo de búnker como se observa en la tabla 11 mientras que el consumo de electricidad no se ve afectado. El ahorro de bunker estimado es de 5 528.8 litros/año, debido a que la producción es por 8 meses se calculó los litros en 8 meses siendo 3686 litros/ 8 meses lo que representa un ahorro económico de \$ 1 555.22 en 8 meses.

Además del ahorro económico, el aislamiento permite una mitigación de emisiones de CO₂ equivalente a 9874 kg de CO₂ por año, lo que tiene un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental y en el cumplimiento de posibles normativas ambientales.

El costo total para implementar el aislamiento de las tuberías de vapor asciende a \$320.1 USD, desglosado de la siguiente manera:

- Compra de equipos y materiales: \$152.6 USD
- Mano de obra: \$138.5 USD
- Imprevistos (10%): \$29.1 USD

No se han considerado costos adicionales por ingeniería o inspección, lo cual ayuda a mantener bajos los gastos de implementación.

La implementación del aislamiento de las tuberías de vapor es una inversión altamente rentable y con rápida recuperación. Los beneficios económicos de \$1 555.22 USD al año superan ampliamente el costo de implementación de \$320.1 USD. Además, este

proyecto ofrece una reducción significativa en las emisiones de CO₂, lo que mejora el desempeño ambiental de la operación.

Se recomienda proceder con la ejecución del proyecto debido a su bajo costo, alto retorno financiero, rápida amortización y el impacto positivo ambiental. También sería beneficioso realizar una evaluación periódica para garantizar que el aislamiento se mantenga en óptimas condiciones y continúe proporcionando los ahorros proyectados.

Tabla 12

Implementación del proyecto aislamiento tuberías aséptico y clarificado

IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO			
EQUPOS Y MATERIALES			
Descripción	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Aislante más cobertor aluminio 3" x 1-1/2 x 1 mts	\$45	3	\$135.00
		Subtotal	\$135.00
		Impuestos 13% IVA	\$17.55
		Total	\$152.55
MANO DE OBRA			
Especialidad	Personas / días	Costo diario	Costo total
Técnico Mecánico	2 1	\$69,23	\$138.46
		Total	\$138.46
INGENIERÍA E IMPREVISTOS			
Imprevistos	10%		\$29.1
		Total	\$29.1
COSTOS TOTAL DE IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO			\$320.1

Nota. Elaboración propia

El costo total de implementación del proyecto se desglosa en tres áreas principales como lo es materiales, mano de obra e imprevistos esto se puede ver en la tabla 12. El costo de los materiales, que incluye aislante con cobertor de aluminio, es de \$152.55, considerando el precio de las tres unidades adquiridas. La mano de obra, que consiste en el trabajo de dos técnicos mecánicos durante un día, asciende a \$138.46. Además, se ha considerado un monto para imprevistos del 10% del costo total, lo que equivale a \$29.1. Sumando todos estos costos, el costo total de implementación del proyecto es de \$320.1, lo que cubre tanto los insumos como la labor y los posibles gastos adicionales que puedan surgir.

Tabla 13

Cálculo de posibles ahorros de la implementación del proyecto aislamiento tuberías aséptico y clarificado

CÁLCULO DE AHORROS		
RESUMEN DE AHORROS CALCULADOS EN BÚNKER		
	Energético	Económico
Consumo anual actual	6040,15 litros / año	2547,56 \$US/año
Consumo anual esperado luego de implementación	511,36 litros / año	215,675 \$US/año
Ahorro potencial anual	5528,79 litros / año	2331,89US\$/año
Ahorro potencial 8 meses	3686 litros/8 meses	1555.22US\$/8meses
Reducción de emisiones anuales de kg de CO2 equivalentes por fuente de energía	9874kg/año	

Nota. Elaboración propia

El cálculo de ahorros relacionados con el consumo de búnker muestra un importante beneficio tanto en el ámbito energético como económico. Actualmente, el consumo anual es de 6040,15 litros/año, lo que representa un gasto de 2547,56 \$US/año. Tras la implementación de las medidas propuestas, se espera reducir el consumo de 6040.15litros a 511,36 litros/año lo que se refleja en un costo de \$215,675 al año. Esto implica un ahorro potencial anual de 5528,79 litros y \$2331,89, para poder obtener una comparación directa con la producción se calcula el potencial ahorro en 8 meses con 3686 litros y \$1555.22 lo que representa una reducción significativa en el uso de combustible y los costos asociados.

Además, se estima una disminución de 9874 kg de CO₂/año, lo que contribuye a la reducción del impacto ambiental.

Con base en los cálculos mencionados previamente se logra obtener una nueva relación entre los litros de bunker respecto a la producción, por el sistema esto posterior a la implementación del proyecto y la relación original permitiendo así obtener un aproximado del ahorro.

Tabla 14

Relación litros de combustible entre toneladas de producción posterior a la implementación del proyecto aislamiento tuberías aséptico y clarificado

Resultado primer proyecto	
Concepto	Valor
Promedio original	64.8 Lt/T
Nueva relación después del proyecto	64.6 Lt/T
Ahorro en la relación	0.11 Lt/T menos

En la tabla 14 se puede observar un posible ahorro aproximado de 3686 litros de bunker por mes, siendo esto un 0.25% del total a la hora de implementar el proyecto de mejora planteado, así como 11478.2 kg de CO₂ evitado.

3.1.5 Aislamiento de tuberías de alimentación de los calefactores

Las tuberías del calefactor de bunker de las calderas de 600BHP y 350BHP no presentan aislamiento, lo cual, además de representar una pérdida de energía, implica un riesgo para los operadores de calderas.

Ilustración 7

Tubería de vapor para atomización y calefactor de la caldera 350BHP



Nota. Elaboración propia

Al igual que con el cálculo del tramo de tubería de la línea de clarificado, se desarrolla el cálculo de pérdidas de calor.

Calor perdido en tuberías sin aislamiento:

$$Q_{sa} \left[\frac{BTU}{hr * pie^2} \right] =$$
$$0.174 * \epsilon \left\{ \left(\frac{T_s + 460}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 460}{100} \right)^4 \right\} + 0.296 * \sqrt[4]{(T_s - T_a)^5} * \sqrt{\frac{(v + 68.9)}{68.9}}$$

Tabla 15

Calor perdido en tuberías sin aislamiento atomización y tuberías del calefactor de las calderas

Tramo	Longitud m	equivalente ft	tubería	Diámetro Nominal in	Diámetro exterior in	Longitud tubería ft ² /ft	Calor perdido BTU/h
Cald. 350BHP	15.00	49.21		0.50	0.84	0.2199	9 445.7
Cald. 600BHP	7.00	22.97		0.50	0.84	0.2199	4 408.0
						Total	13 853.6

Nota. Elaboración propia

Con el fin de obtener una comparación que permita respaldar la importancia de implementar el aislamiento se realiza el cálculo de calor perdido con tuberías con aislamiento:

$$Q_{CA} \left[\frac{BTU}{hr * ft^2} \right] = \frac{(T_i - T_a)}{\left\{ \left(\frac{r_s}{k} \right) * \ln \left(\frac{r_s}{r_i} \right) + \frac{1}{f} \right\}}$$

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 16 de calor perdido en tuberías con aislamiento atomización y calefactor de las calderas:

Tabla 16

Calor perdido en tuberías con aislamiento tuberías de atomización y calefactor de las calderas

Tramo	Diámetro externo in	Espesor de aislamiento in	Radio con aislamiento in	Qca BTU/ h ft ²	Área con aislamiento ft ² /ft	Calor perdido BTU/h
Cald. 350BHP	0.50	1.00	1.42	54.22	0.74	1983.80
Cald. 600BHP	0.50	1.00	1.42	54.22	0.74	925.77
					Total	2909.57

Nota. Elaboración propia

Se puede observar una diferencia de 10 944.03 BTU/H en calor perdido debido a la no implementación de aislante en estos tramos de atomización y calefactor. En otras palabras, se puede explicar el ahorro que se puede obtener a partir de una comparación del calor perdido en MBTU/año con respecto al combustible que se consume con o sin el aislamiento respectivo como se ve en la tabla 17 posible de ahorro obtenido.

Tabla 17

Posible ahorro obtenido aislamiento de tuberías de alimentación de los calefactores y automatización de bunker

	Sin aislamiento	Con aislamiento	Ahorro	Unidades
Energía	91 434	13 093	78 341	MBTU / años
Búnker	2 840	407	2 433	Litros / años

Nota. Elaboración propia

Al realizar el análisis de los datos obtenidos se desarrolló la tabla 18, en donde se explican los ahorros obtenidos, esto a partir de la identificación y descripción del problema, el cual se observa en el área de producción la presencia de tuberías de vapor sin aislamiento térmico Para el análisis de las tuberías se toma en cuenta la tubería de vapor de calefactor de bunker y atomización de la caldera de 350BHP, la cual es una tubería de ½”, con una longitud de 15 metros, y la tubería de vapor de calefactor de bunker de la caldera de 600BHP con una tubería de ½” con una longitud de 7 metros, ambos tramos sin aislamiento.

Tabla 18

Resumen de resultados proyecto aislamiento de tuberías de alimentación de los calefactores y automatización de bunker

AISLAMIENTO DE TUBERÍAS DE VAPOR			
Electricidad	Búnker	Sistema	Agua
No	Sí	Vapor	No
Descripción: Aislar las tuberías de vapor que salen de cada caldera (350 BHP Y 600BHP) y alimentan sus calefactores de búnker y la tubería de atomización con vapor de la caldera 350BHP			
Se propone aislarlas para reducir la pérdida de energía térmica y ahorrar combustible.			
Resumen de Resultados			
Ahorros Obtenidos			
Energía	Ahorro energético	Ahorro económico	
Eléctrica	0,0kWh/año	0,0 US\$/año	
Búnker	2 433,3 litros /año	1 026,3 US\$/año	
Búnker	1 622 litros/ 8 meses	683,99 US\$/meses	
Total		683,99 US\$/año	
Ahorro Total		683,99 US\$/año	
Mitigación de emisiones CO2		7 545,7 kg CO2/año	
Mitigación de emisiones CO2		4 348 kg/CO2	
		8meses	
Costos de Implementación			
Compra de equipos y materiales		770,66	US\$
Mano de obra		138,5	US\$
Otros		0	US\$
Subtotal		909,1215	US\$
Ingeniería	0%	0	US\$
Inspección	0%	0	US\$

Imprevistos	10%	90,91	US\$
Total		1000,03	US\$

Nota. Elaboración propia

Como resultado de la implementación de aislamiento en los 22 metros de longitud de alimentación de los calefactores y automatización de bunker de ambas calderas en la tabla 19, se logró calcular un posible ahorro de 2 433,3 litros de búnker al año, lo que equivale a \$1026.3 US/año, representando un 0,19 % de reducción en el consumo de búnker. Adicionalmente, la mitigación de emisiones de CO₂ alcanza los 7545,7 kg/año, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. La inversión total en la implementación fue de 1 000,03 US\$, incluyendo equipos, materiales, mano de obra e imprevistos.

Tabla 19

Implementación del proyecto aislamiento tuberías alimentación de los calefactores y automatización de bunker de las calderas 350 y 600BHP

IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO			
EQUPOS Y MATERIALES			
Descripción	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Aislante más cobertor aluminio 1/2" x 1" x 1 mt	31\$US	22	682 \$US
		Subtotal	682\$US
		Impuestos 13% IVA	88,66\$US
		Total	770,66\$US
MANO DE OBRA			
Especialidad	Personas / días	Costo diario	Costo total
Técnico Mecánico	2 1	69,23\$US	138,46\$US
		Total	138,46\$US
INGENIERÍA E IMPREVISTOS			
Imprevistos	10%		90,91

Total	90,91
COSTOS TOTAL DE IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	1000,03\$US

Nota. Elaboración propia

La implementación del proyecto de aislamiento de tuberías de vapor requiere la adquisición de equipos y materiales, así como la contratación de mano de obra especializada y la consideración de costos adicionales por imprevistos. A continuación, se detallan los costos asociados a cada uno de estos rubros:

- Equipos y materiales

El principal material utilizado en el proyecto es el aislante con cobertor de aluminio, con dimensiones de 1/2" x 1" x 1 metro. Se adquirieron 22 unidades, con un costo unitario de 31 US\$, lo que representa un subtotal de 682 US\$. Adicionalmente, se aplicó un 13 % de IVA, equivalente a 88,66 US\$, resultando en un costo total de 770,66 US\$ en materiales.

- Mano de obra

Para la instalación del aislante, se requirió la contratación de un técnico mecánico durante dos días de trabajo, con un costo diario de 69,23 US\$, lo que representa un gasto total de 138,46 US\$ en mano de obra. Este costo garantiza la correcta ejecución del aislamiento y la optimización del rendimiento térmico en las tuberías de vapor.

- Ingeniería e imprevistos

Aunque no se consideraron costos adicionales por ingeniería o inspección, se incluyó un 10 % de imprevistos, correspondiente a 90,91 US\$, para cubrir cualquier eventualidad que pudiera surgir durante la instalación del aislante.

- Costo total de implementación

Sumando todos los rubros anteriores, el costo total de implementación del proyecto asciende a 1 000,03 US\$, lo que representa una inversión relativamente baja en comparación con los beneficios obtenidos en ahorro de combustible y reducción de emisiones de CO₂. Esta inversión permitirá optimizar la eficiencia térmica del sistema de vapor y garantizar un retorno de inversión rápido.

Tabla 20

Posibles ahorros obtenidos aislamiento de tuberías de alimentación de los calefactores y automatización de bunker

CÁLCULO DE AHORROS		
RESUMEN DE AHORROS CALCULADOS		
Búnker		
	Energético	Económico
Consumo anual actual	2839,99litros / año	1197,83 \$US/año
Consumo anual esperado luego de implementación	406,68 litros / año	171,53 \$US/año
Ahorro potencial anual	2 433,31 litros / año	1026,30US\$/año
Ahorro potencial 8 meses	1 622 litros/8meses	683,99US/8meses
Reducción de emisiones anuales de kg de CO2 equivalentes por fuente de energía	7 545,7kg/año	
Reducción de emisiones anuales de kg de CO2 equivalentes por fuente de energía	4348kg/8meses	

Nota. Elaboración propia

El cálculo de ahorros generado a partir de la implementación del aislamiento en las tuberías de vapor refleja una reducción significativa en el consumo de búnker como se observa en la tabla 18, lo que impacta tanto en el ámbito energético como económico. Antes de la implementación, el consumo anual de búnker era de 2 839,99 litros/año, con un costo de 1 197,83 US\$/año. Tras la optimización del sistema, se estima que el consumo se reducirá a 406,68 litros/año, representando un ahorro de 171,53 US\$/año.

Como resultado, el ahorro potencial anual alcanza los 2 433,31 litros de búnker, lo que equivale a un beneficio económico de 1 026,30 US\$/año. Además del impacto financiero, la reducción en el consumo de combustible genera una mitigación de emisiones de CO₂ de 7 545,7 kg/año, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y a la disminución de la huella de carbono del sistema. Para una relación adecuada a los parámetros de estudio respecto a la producción se calculó en 8 meses respecto a los datos de producción que se brindaron

obteniendo un resultado de 1622 litros /8meses con un beneficio económico de \$683,99 /8 meses y una mitigación de gases 4348 kg/8meses.

Estos resultados demuestran que la implementación del aislamiento en las tuberías de vapor no solo genera ahorros considerables en costos operativos, sino que también promueve la eficiencia energética y el compromiso con la reducción de emisiones contaminantes.

Con base en los cálculos mencionados previamente se logra obtener una nueva relación entre los litros de bunker respecto a la producción por el sistema, esto posterior a la implementación del proyecto y la relación original permitiendo así obtener un aproximado del ahorro. Esto se ve reflejado en la tabla 21

Tabla 21

Relación de litros toneladas posterior a la implementación del proyecto aislamiento de tuberías de alimentación de los calefactores y automatización de bunker

Concepto	Valor
Promedio original	64.8 Lt/T
Relación después del primer proyecto	64.69 Lt/T
Relación después del segundo proyecto	64.61 Lt/T
Ahorro total acumulado	5,308 litros en 8 meses

En la tabla 21 se puede observar un posible ahorro aproximado de 1622 litros de bunker por mes, siendo esto un 0.11% del total a la hora de implementar el proyecto de mejora planteado así como 5050 kg CO2.

3.1.6 Control bombas de bunker

Las bombas de búnker que envían combustible a las calderas y recirculan al tanque diario se encuentran siempre encendidas en las tres calderas. Sin embargo, la caldera de 250BHP funciona solo como respaldo de las calderas de 600BHP y 350BHP, por lo que no es necesario que su bomba de bunker se encuentre encendida todo el tiempo.

Ilustración 8

Bombas de alimentación de búnker de calderas



Nota. Elaboración propia

Se propone controlar esta bomba mediante un pequeño PLC de tal forma que, siempre que la caldera 250 BHP se encuentre apagada, su bomba de búnker opere en un esquema de cinco minutos encendida y diez minutos en descanso, reduciendo el tiempo de operación y generando un ahorro en energía eléctrica. En la tabla 22 se muestra la determinación del posible ahorro esperado.

Tabla 22*Posible ahorro de tiempo de operación de la bomba*

Determinación del ahorro al reducir tiempo de operación de la bomba				
CALDERA 250 BHP		Actual	Operación esperada	Descanso esperado
Potencia	[kW]	0.56	0.56	0,56
Cantidad bombas	[h/día]	1	1	1
Horas diarias operación	[día/sem]	246		
Días a la semana	Semanas al año	50		
Horas anuales	[h/día]	7200	0	2400
Consumo anual	[kWh/año]	4,026.78	0.00	1,342.26
AHORRO ESPERADO 2,684.52 kWh/año				

Nota. Elaboración propia

En la tabla 22, se puede verificar que este ajuste en la operación de la bomba de la caldera genera un ahorro energético significativo, reduciendo el consumo en más de dos tercios (66.7%). Se plantea reducir el tiempo de operación de la bomba en 4,800 horas/año, pasando de 7,200 a 2,400 horas, con esta disminución permite reducir el consumo de energía en 2,684.52 kWh/año, lo que representa un 66.7% de ahorro energético respecto al consumo inicial, este ahorro disminuye costos operativos y mejora la eficiencia energética del sistema, sin afectar la capacidad de la bomba, ya que se optimiza su tiempo de operación.

Además, es de importancia al implementar el proyecto realizar un cambio en la instalación de las tuberías de búnker que alimentan la caldera proveniente de las bombas, ya que estas tuberías actualmente viajan por desagües con parrilla como se puede observar en la ilustración 9, y se propone realizar el tiraje de tubería aéreo para poder aislarlas y no tener pérdidas. Realizando esto incluso se podría aumentar aún más el tiempo de apagado de las bombas, pero para efectos de este análisis se hará un estimando conservador. Además, se observó que algunos desagües se encuentran con agua, lo que actualmente debe estar contribuyendo a una mayor pérdida de calor.

Ilustración 9

Tuberías de búnker en trincheras inundadas de agua



Nota. Elaboración propia

Para el desarrollo de la mejora en las tuberías de búnker que alimentan la caldera proveniente de las bombas, se plantea la implementación de una distribución aérea en el cual se pueda aislar las tuberías y no tener pérdidas calóricas; esto contemplando sobre todo pérdidas de calor en esta.

Actualmente la tubería con combustible viaja por medio de una rejilla que contiene la zona de las calderas ante derrames o lavados en esta zona; debido a la naturaleza de esta rejilla se mantiene en algunos casos con agua, por lo que, al pasar la tubería por esta zona, tiene una importante pérdida de calor, provocando a su vez la disminución de la viscosidad del combustible bunker y por ende afectaciones en la correcta combustión de la caldera. Esto se refleja en la Ilustración 10.

Ilustración 10

Representación de distribución de bunker actual hacia las calderas

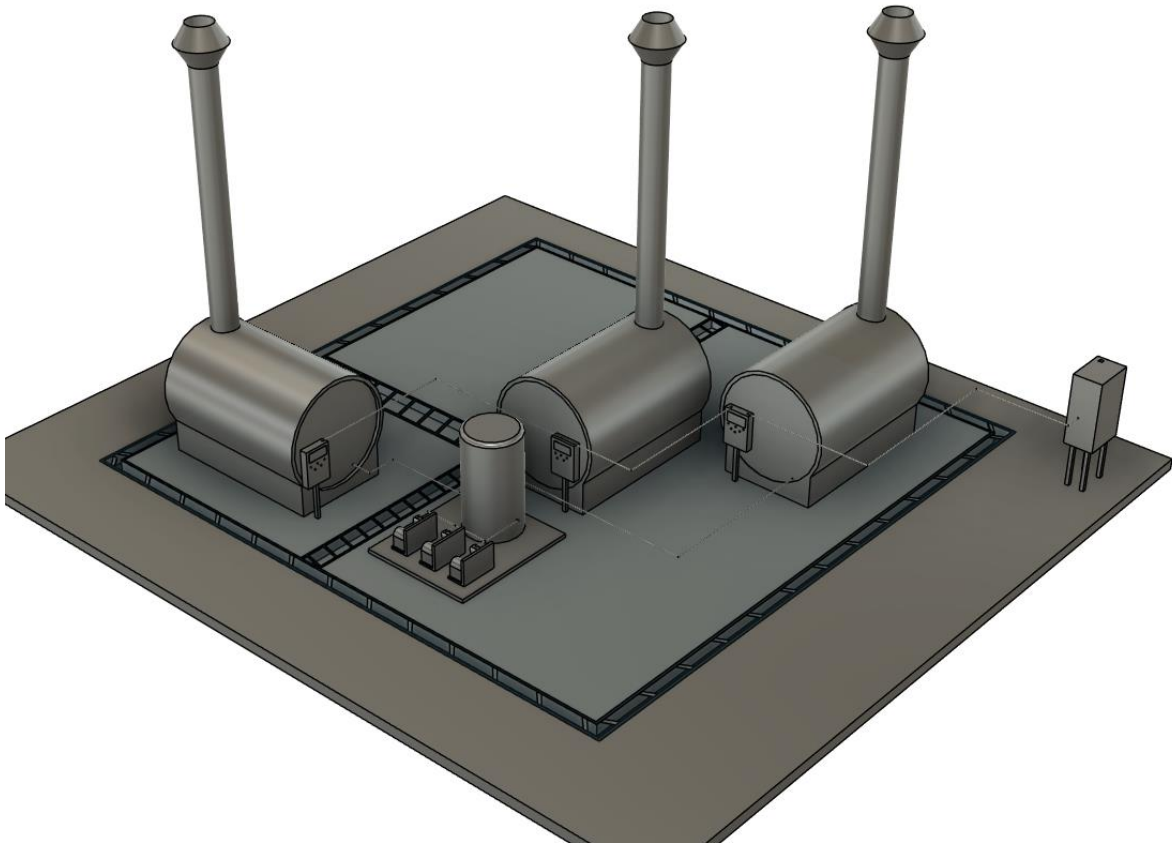


Nota. Elaboración propia

Como propuesta se trabaja en una nueva distribución que involucra una forma en la que se puede instalar la tubería de modo que no se encuentre fuera del anillo de contención antiderrames de rejilla, pero si afuera directamente de esta rejilla que provoca la pérdida de calor esto se puede observar en la ilustración 11 y 12, esto mediante el software Fusion 360.

Ilustración 11

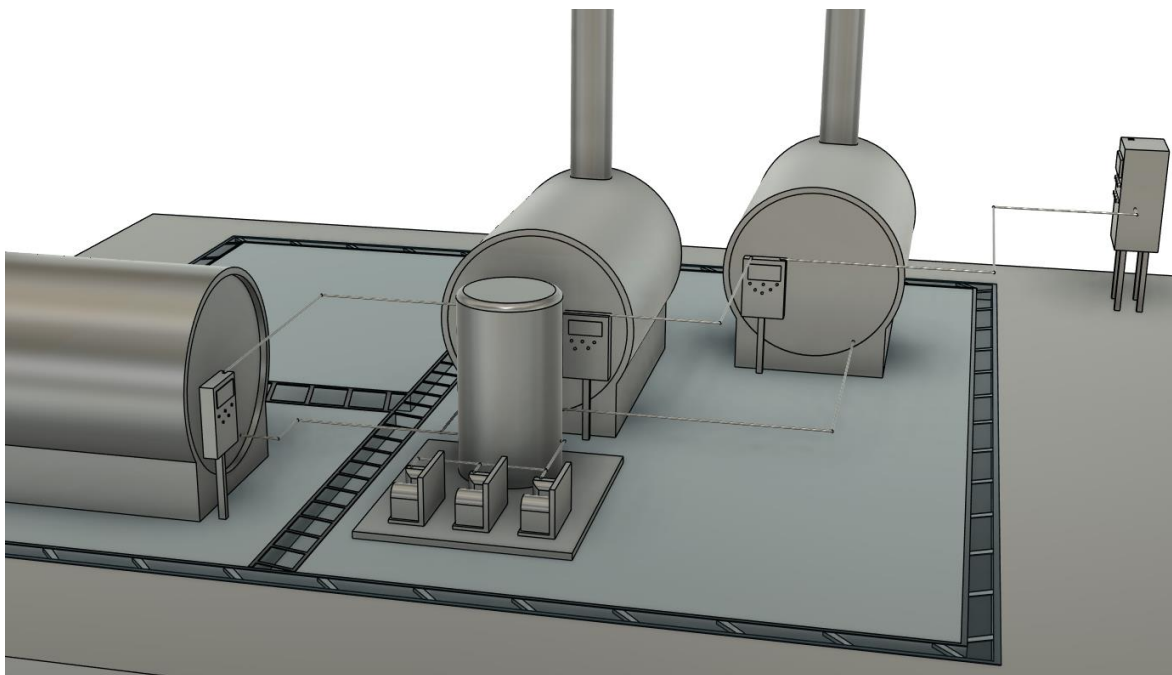
Propuesta de nueva distribución de tubería de bunker a las calderas.



Nota. Elaboración propia

Ilustración 12

Propuesta de nueva distribución de tubería de bunker a las calderas vista frontal



Nota. Elaboración propia

Para el desarrollo del proyecto se planteó la selección del PLC como primer aspecto, dentro de diversas posibilidades se selecciona el PLC Siemens S7-1200, debido a que permite cumplir con las condiciones mínimas de funcionamiento requeridas, así como mayor flexibilidad, escalabilidad y comunicación avanzada, además de que actualmente la empresa implementó el sistema siemens LMVS2 para la automatización del sistema de combustión, por tanto, influye la compatibilidad con este sistema para una automatización completa de diversos aspectos en el cuarto de calderas. Su capacidad para manejar temporizadores precisos, junto con su compatibilidad con Profinet, Modbus y Ethernet, permite integrarlo fácilmente en sistemas SCADA o HMI para monitoreo remoto. Además, su diseño modular facilita la expansión de entradas y salidas, lo que lo hace ideal si en el futuro se desea automatizar más procesos o agregar sensores adicionales.

En la ilustración 13 se puede observar la modulación de un PLC S7-1200 en conjunto con varios módulos para diversos usos respectivamente.

Ilustración 13

Representación PLC S7-1200



Nota. Recuperado de Siemens México (S, F)

Así mismo se plantea una posible programación que permita que la bomba de bunker debe encenderse por 5 minutos y apagarse por 10 minutos en un ciclo continuo, por tanto, este ciclo debe activarse cuando la caldera no esté funcionando, para esto se utiliza una entrada digital para detectar el estado de la caldera y la bomba se controlaría con una salida digital. En la ilustración 10 se representa la posible programación ladder.

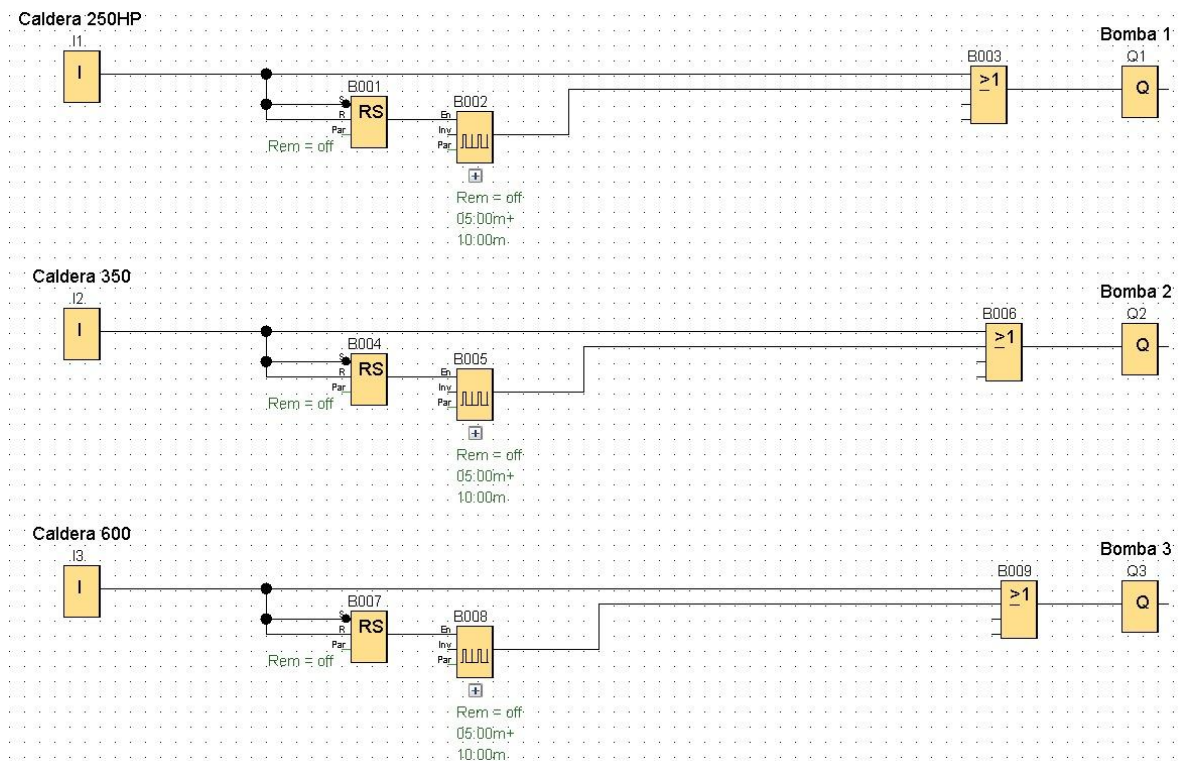
El requerimiento de la programación propuesta tiene como objetivo mantener el combustible búnker en condiciones adecuadas para su uso futuro, en este caso dentro de los aspectos a tomar en cuenta se puede mencionar:

- ✓ Evitar el enfriamiento y solidificación del búnker, este combustible tiene una alta viscosidad y requiere mantenerse caliente para poder fluir adecuadamente por las tuberías. Cuando la caldera está apagada, la temperatura de las líneas y del tanque puede disminuir, especialmente si no hay recirculación.
- ✓ Homogeneización del combustible, debido a que el bunker por sus características puede tener sedimentación si está mucho tiempo en reposo, por lo que mantenerlo en movimiento permite evitar la separación de fases (agua, sedimentos, etc)

- ✓ Protección de la bomba, el implementar un ciclo continuo de funcionamiento podría sobrecalentar o desgastar la bomba, especialmente si no hay consumo de combustible en ese momento. Por eso, el ciclo de 5 minutos ON y 10 minutos OFF busca un balance entre movimiento suficiente del fluido y protección del equipo.
- ✓ Ahorro energético, ya que el no mantener el sistema de bombas encendido todo el tiempo permite un ahorro de energía eléctrica y se reduce el desgaste mecánico.

Ilustración 14

Representación Ladder de la programación a implementar para el PLC



Nota. Elaboración propia

Como se observa en la ilustración 14, como explicación de la programación, la misma se explica en pasos como primer paso se realiza la definición de variables donde se declaran las entradas, salidas y variables auxiliares necesarias para el control. Como segundo paso se establece una condicional para el estado de la caldera, donde si esta se encuentra encendida la

bomba se mantiene encendida, pero si la caldera se mantiene apagada se inicia la secuencia de los temporizadores de ciclo, esto por 5 min y descansa 10 min, esto para el control de las 3 calderas.

En la Tabla 23 se muestra el resumen de resultados del proyecto, y se detallan los costos de inversión estimados, los cuales corresponden al PLC de control para la bomba, el aislamiento y materiales para la reubicación de las tuberías y la mano de obra.

Tabla 23

Posible ahorro control de bombas

AHORROS OBTENIDOS BOMBAS			
Energía	Ahorro Energético	Ahorro económico	% de ahorro
Eléctrica	2,684.5kWh/año	356.3 US\$/año	0.04%
Búnker	0.0litros/año	0.0US\$/año	0.00%
	Total	356.3US\$/año	
	Mitigación de emisiones CO2	107.4kg /año	0.001%
COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN			
	Compra de equipos y materiales		1099,5US\$
	Mano de obra		694,5US\$
	Otros		0.0US\$
	Subtotal		1794US\$
	Ingeniería 0%		0US\$
	Inspección 0%		0US\$
	Imprevistos 10%		179US\$
	Total		1973US\$

Nota. Elaboración propia

De acuerdo con el análisis presentado en la tabla 23 se puede ver un ahorro energético de 2,684.5 kWh al año, lo que se traduce en un ahorro económico de 356.3 US\$/año, representando un ahorro energético del 0.04%. Aunque no se ha logrado ahorro con el uso de búnker, el impacto en la mitigación de emisiones de CO2 es de 107.4 kg al año, con una

reducción del 0.001%. Los costos de implementación del sistema fueron de 1,973US\$, incluyendo compra de equipos, mano de obra e imprevistos.

Al realizar el análisis de los datos obtenidos se desarrolló la Tabla 24, en donde se explican los posibles ahorros obtenidos, esto a partir de la identificación y descripción del problema, como lo es el encendido de la bomba de la caldera de 250BHP permanentemente, por lo que se analizó los posibles ahorros, así como el costo de implementación al desarrollar el proyecto como solución.

Tabla 24

Resumen de resultados proyecto control de bombas de bunker

Control bombas de bunker			
Electricidad	Búnker	Sistema	Agua
Sí	No	Vapor	No
Descripción: Reducir el tiempo de operación de la bomba de búnker ligada a la caldera 250BHP que se mantiene siempre como respaldo.			
Actualmente la bomba corresponde de 7.5HP trabaja 24/7 y se propone reducir este tiempo a 5 min encendida por cada 10 min apagada siempre que la caldera no esté en funcionamiento.			
Para esto se requiere sacar la tubería de búnker de la trinchera y aislarla.			
Resumen de Resultados			
	Ahorros Obtenidos		
Energía	Ahorro energético	Ahorro económico	% de ahorro
Eléctrica	2 684.5kWh/año	356.3 US\$/año	0,04%
Búnker	0 litros /año	0.0 US \$/año	0,00%
Total		356.3 US\$/año	
Ahorro Total		356.3US\$/año	
Mitigación de emisiones CO2		107,4 kg/año	0,001%
Costos de Implementación			
Compra de equipos y materiales		1099,5	US\$
Mano de obra		694,5	US\$

Otros		0	US\$
Subtotal		1794	US\$
Ingeniería	0%	0	US\$
Inspección	0%	0	US\$
Imprevistos	10%	179	US\$
Total		1 973,00	US\$

Nota. Elaboración propia

La implementación del proyecto de control de las bombas de búnker tiene un impacto ambiental positivo al reducir el consumo eléctrico y optimizar el funcionamiento del sistema. Actualmente, la bomba opera de manera continua las 24 horas del día, generando un alto consumo energético. Con la nueva estrategia de operación, en la que la bomba funcionará en ciclos de 5 minutos encendida y 10 minutos apagada cuando la caldera no esté en uso, se logrará una reducción significativa del consumo eléctrico en 2,684.5 kWh al año. Esto no solo representa un ahorro económico de 356.3 US\$/año, sino que también disminuye la demanda de energía en la red eléctrica, contribuyendo a la reducción del uso de combustibles fósiles en la generación de electricidad.

Otro beneficio ambiental clave es la reducción de 107.4 kg de CO₂ al año, ya que al consumir menos electricidad se evita la emisión de gases de efecto invernadero. Aunque el porcentaje de mitigación puede parecer pequeño, cada reducción contribuye a la disminución del impacto ambiental y al cumplimiento de objetivos de sostenibilidad. Además, al operar la bomba solo cuando es estrictamente necesario, se optimiza su vida útil y se reduce el desgaste innecesario de los equipos, mejorando la eficiencia del sistema sin afectar su operatividad.

Un aspecto adicional que contribuye a la eficiencia del sistema es la reubicación y aislamiento de la tubería de búnker. Esta medida evitará pérdidas de calor, reduciendo la necesidad de energía adicional para mantener la temperatura adecuada del combustible. Al minimizar el desperdicio de calor, se mejora la eficiencia térmica del sistema y se evita un consumo innecesario de recursos energéticos.

Este proyecto permite reducir el impacto ambiental al optimizar el uso de la bomba de búnker, disminuir el consumo de energía eléctrica y mitigar la emisión de CO₂. Además,

la implementación de mejoras en la infraestructura asegura un uso más eficiente de los recursos a largo plazo, promoviendo una operación más sostenible del sistema.

Tabla 25

Implementación del proyecto control de bombas

IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO			
EQUPOS Y MATERIALES			
Descripción	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
PLC	876,88 US\$	1	876,88
Aislamiento	38US\$	15	570
Tubería y accesorios	50,4US\$	3	151,2
		Subtotal	1598,08
		Impuestos 13% IVA	207,74
		Total	1805,82
MANO DE OBRA			
Especialidad	Personas / días	Costo diario	Costo total
Técnico Mecánico	2 1	69,23\$US	138,46
		Total	138,46\$US
INGENIERÍA E IMPREVISTOS			
Imprevistos	10%		29,1
		Total	29,1\$US
COSTOS TOTAL DE IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO		\$US	1973,38

Nota. Elaboración propia

El costo total de los equipos y materiales necesarios para la implementación del proyecto se desglosa en varios componentes. El PLC tiene un costo unitario de 876,88 USD, con una cantidad de 1 unidad, lo que da un total de 876,88 USD. En cuanto al aislamiento, se requiere 15 unidades a un precio unitario de 38 USD, lo que da un total de 570 USD. Por otro lado, la tubería y sus accesorios tienen un costo unitario de 50,4 USD, con una cantidad de 3 unidades, lo que resulta en un total de 151,2 USD. El subtotal de estos componentes es 1598,08 USD. A esto se le debe agregar el 13% de IVA (impuesto al valor agregado), lo que

incrementa el costo en 207,74 USD, llevando el total a 1805,82 USD para los equipos y materiales.

En términos de mano de obra, se considera el trabajo de un técnico mecánico, que realizará la instalación y el trabajo asociado. Se ha presupuestado que dos personas trabajarán por un total de 1 día, con un costo diario de 69,23 USD por persona. Esto da un costo total de 138,46 USD para la mano de obra.

En cuanto a los imprevistos, se ha destinado un 10% adicional para cubrir cualquier costo inesperado que pudiera surgir durante la ejecución del proyecto. El costo total de implementación del proyecto se obtiene sumando los costos de equipos y materiales (1805,82 USD), la mano de obra (138,46 USD), y los imprevistos (29,1 USD). Esto da un total general de 1973,38 USD para la implementación completa del proyecto.

3.1.7 Eficiencia de Combustión de la caldera de 600BHP

Durante la medición de gases de combustión realizada a las calderas 350BHP y 600BHP se detectó que esta última presenta valores de exceso de oxígeno muy altos a lo largo de la curva de combustión, lo cual impacta la eficiencia de esta. Para desarrollar la medición de gases se utiliza el medidor ENERAC 500.

Ilustración 15

Eficiencia de combustión de la caldera de 600BHP



Nota. Elaboración propia

La medición realizada es la siguiente:

Tabla 26

Medición de gases caldera 600BHP

Carga (%)	T gases (°C)	O2 (%)	CO (ppm)	CO2 (%)
30 %	184 °C	9.5 %	0 ppm	8.7 %
50 %	195 °C	5.9 %	0 ppm	11.5%
75 %	210.8 °C	7.3 %	0 ppm	10.4%
100 %	216.9 °C	6.9 %	3 ppm	10.7%

Nota. Elaboración propia

Con base en los datos obtenidos en la tabla 26, se puede inferir que el análisis de gases de la caldera de 600 BHP muestra una relación directa entre la carga y la temperatura de los gases, aumentando de 184 °C a 216,9 °C al pasar del 30 % al 100 % de carga, lo cual es esperado debido a una combustión más intensa, aunque temperaturas muy elevadas pueden indicar pérdidas energéticas.

El dióxido de carbono (CO₂) juega un papel crucial en el impacto positivo de la mejora en la eficiencia de combustión de la caldera de 600 BHP. En términos de combustión, la presencia de CO₂ es un indicador directo de cuán eficiente es el proceso de combustión del bunker. En una combustión ideal, se produce más CO₂ y menos monóxido de carbono (CO), lo cual indica que el combustible se está utilizando de manera más completa y eficiente.

Por su parte los niveles de oxígeno (O₂) disminuyen a medida que aumenta la carga, pasando de 9,5 % a 6,9 %, lo que sugiere un exceso de aire en cargas bajas (30 %), reduciendo la eficiencia de combustión. Los valores de CO (monóxido de carbono) se mantienen en 0 ppm en la mayoría de los casos, excepto en 100 % de carga, donde alcanzan 3 ppm, indicando una combustión adecuada con mínima presencia de gases tóxicos. El CO₂ (dióxido de carbono) varía entre 8,7 % y 11,5 %, con el valor más alto a 50 % de carga, lo que refleja una combustión más eficiente en ese punto, ya que un mayor porcentaje de CO₂ suele estar asociado a una mejor combustión.

El ajuste propuesto, al reducir el porcentaje de oxígeno y mantener el CO₂ a un nivel óptimo, permite que el proceso de combustión sea más eficiente. Esto no solo incrementa la cantidad de energía útil generada por la caldera, sino que también reduce las emisiones no deseadas, como el CO (monóxido de carbono) y otros contaminantes, lo cual contribuye a un impacto ambiental positivo y mejora la sostenibilidad del sistema de generación de calor.

Además, el uso de un sistema automatizado y preciso para regular la relación aire-combustible, como el LMVS2 de Siemens, con la capacidad de hacer ajustes en tiempo real, asegura que el nivel de CO₂ se mantenga dentro de un rango ideal durante toda la operación de la caldera. Esta precisión no solo mejora la eficiencia de la combustión, sino que también optimiza el rendimiento y reduce costos operativos a largo plazo.

En resumen, el CO₂ es un marcador clave de la eficiencia de combustión. Mantener un nivel adecuado de CO₂ indica que el combustible se está utilizando de manera más eficiente, lo que lleva a un ahorro de energía, reducción de costos operativos y un menor impacto ambiental. La mejora en la eficiencia de combustión propuesta para la caldera de 600 BHP se basa en un ajuste preciso del oxígeno, lo que a su vez optimiza la cantidad de CO₂ producido y genera un beneficio tanto económico como ambiental.

Con base en la situación actual, se propone mejorar la eficiencia de combustión de la caldera de 600BHP ajustando y manteniendo el porcentaje de oxígeno en 4% para todo el rango de operación de la caldera. En la Tabla 27 se muestran las condiciones de operación actuales (promedio) y recomendadas.

Tabla 27

Parámetros Recomendados de Operación

Parámetros	Unidades	Actuales	Esperadas
%O ₂		7.4	4
%CO		0	0
%CO ₂		10	10
T chimenea	°F	395	386
Presión	Psig	125	125

Nota. Elaboración propia

Para determinar la eficiencia actual y esperada a partir de los parámetros anteriores, se utilizó el procedimiento de la ASME PTC 4, método indirecto. En la tabla 28 se muestran las eficiencias obtenidas en cada caso.

Tabla 28

Mejora en la eficiencia al reducir el porcentaje de oxígeno

η actual	85,01%
η esperada	87.51%
η mejora	2,5%

Nota. Elaboración propia

El proyecto propuesto consta de la capacitación y correcto uso del sistema con el que se cuenta actualmente, en este caso la temperatura de los gases de chimenea es monitoreada por el operador una vez en turno lo que permite un control del rendimiento y emisiones. Su número de serie es L-88195 para el sistema de automatización de la combustión Siemens modelo LMVS2, el cual integra la regulación de la proporción aire-combustible y el control de potencia en un único dispositivo, eliminando la necesidad de varillajes mecánicos y mejorando la precisión y eficiencia del proceso de combustión.

Cuenta con un control preciso de la relación aire-combustible ya que utiliza servomotores en paralelo que ajustan con una precisión de 1/10 de grado, asegurando una mezcla óptima en todo el rango de modulación, además cuenta con sensores de oxígeno en la chimenea para medir continuamente los niveles de O₂ en los gases de combustión, permitiendo ajustes en tiempo real para mantener una combustión eficiente y segura así mismo cuenta con un protocolo de comunicación MODBUS, que facilita la integración y supervisión de sistemas automatizados industriales.

Actualmente a pesar de contar con este sistema moderno no se cuenta con un personal capacitado para la verificación de los datos que este brinda o bien en caso de requerirse una calibración inicial requerida, por tanto, se propone una capacitación de uso y calibración para aprovechar el sistema y obtener un mayor ahorro.

Por tanto, en la tabla 29 se muestra el resumen de resultados del proyecto. Se recomienda la capacitación de los operadores para hacer uso del Enerac 500 que recientemente fue adquirido por la empresa durante el año 2023 para verificación de los datos que brinda el sistema LMVS2. Además, se considera un costo para la implementación de un módulo de sensor QGo20 además del módulo de expansión LMS11 para realizar una

automatización en la medición de gases de manera constante que permita un ajuste de la curva de combustión de la caldera de 600BHP una vez cada cierto periodo, para garantizar que los parámetros se mantienen de forma óptima.

Tabla 29

Posibles ahorros obtenidos por la corrección de eficiencia de combustión caldera 600BHP

AHORROS OBTENIDOS CORRECCIÓN EFICIENCIA			
DE COMBUSTIÓN CALDERA 600BHP			
Energía	Ahorro energético	Ahorro económico	% de ahorro
Eléctrica	0,0kWh/año	0,0 US\$/año	0,00%
Búnker	46 057.4 litros/año	19 425,7 US\$/año	1,61%
	Ahorro costos operativos	1000 US\$/año	
	Total	18 425,7US\$/año	
	Mitigación de emisiones CO2	142 823.9kgeq/año	1,61%
COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN			
	Compra módulo QGo20 y LMS11		1000US\$
	Mano de obra		1000US\$
	Otros		0US\$
	Subtotal		2000US\$
	Ingeniería 0%		0US\$
	Inspección 0%		0US\$
	Imprevistos 20%		200US\$
	Total		2200US\$

Nota. Elaboración propia

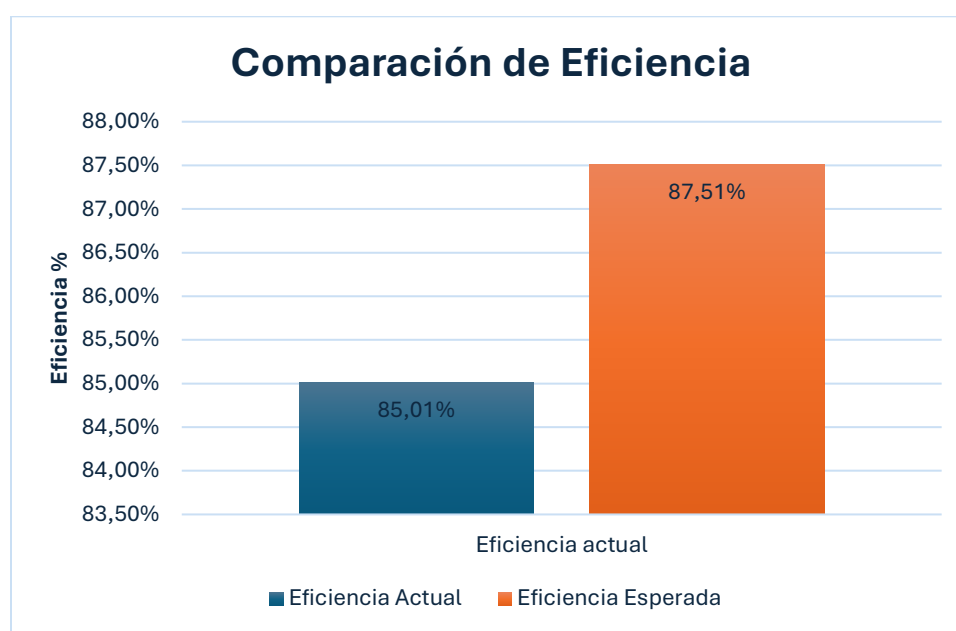
Al realizar los cálculos se puede observar en la tabla 29 que la corrección de oxígeno en la curva de combustión genera que la eficiencia de combustión en la caldera 600 BHP genere ahorros significativos, especialmente en el consumo de búnker, con una reducción de 46 057.4 litros/año, equivalente a \$19 425.7/año, lo que representa un 0,19 % de ahorro, así mismo esta mejora también ha permitido una mitigación de 142 823.9 kg de CO₂/año. Además, debido a que ya se cuenta con el analizador ENERAC 500 los costos de

implementación fueron mínimos, sumando \$1200 aproximados, incluyendo mano de obra e imprevistos.

Al hacer la implementación de la corrección de oxígeno se logra observar una mejora en la eficiencia de combustión de alrededor de 2.5% como se observa en el gráfico 8.

Gráfico 8

Comparación de eficiencia con corrección de curva de oxígeno



Nota. Elaboración propia

La mejora de eficiencia en un sistema térmico, como el de una caldera, tiene un impacto significativo tanto en el ahorro de combustible como en la reducción de emisiones de CO₂. Un aumento del 2.5% en eficiencia implica que se requiere menos combustible para generar la misma cantidad de energía o calor, lo que se traduce en un uso más optimizado de los recursos. Al reducir el consumo de combustible, los costos operativos disminuyen considerablemente, ya que el combustible representa uno de los principales gastos en sistemas industriales. Además, una mayor eficiencia contribuye a un menor desgaste de los componentes, prolongando la vida útil del equipo y reduciendo la necesidad de mantenimiento correctivo.

Desde el punto de vista ambiental, la eficiencia energética juega un papel clave en la mitigación de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Al quemar menos combustible, la cantidad de CO₂ liberada a la atmósfera disminuye proporcionalmente, lo que ayuda a combatir el cambio climático y a cumplir con normativas ambientales más estrictas. Esta reducción en emisiones no solo beneficia al medio ambiente, sino que también mejora la imagen de la empresa en términos de responsabilidad ambiental y sostenibilidad.

Para visualizar el impacto de esta mejora, supongamos que una caldera consume 1,000 litros de búnker por día. Con una mejora del 2.5% en eficiencia, se ahorrarían 25 litros de combustible diarios. Dado que la combustión de búnker genera aproximadamente 2.7 kg de CO₂ por litro, esto significaría una reducción de 67.5 kg de CO₂ al día, lo que equivale a más de 24 toneladas de CO₂ evitadas en un año.

Por tanto, una mejora en la eficiencia energética no solo representa un beneficio económico al reducir el consumo de combustible, sino que también tiene un impacto positivo en el medio ambiente al disminuir la huella de carbono de la operación. Implementar estrategias de eficiencia es clave para optimizar recursos, mejorar la sostenibilidad y garantizar el cumplimiento de regulaciones ambientales.

Por su parte la implementación del proyecto en la tabla 30 que busca optimizar la eficiencia de combustión de una caldera de 600 BHP mediante el ajuste y mantenimiento del porcentaje de oxígeno en 4% en todo su rango de operación. Indica que se requiere la contratación de un especialista en eficiencia de combustión por un día, con un costo de 1000 USD, esto con el fin de una capacitación del equipo, de manera que obtengan el conocimiento para la calibración del sistema LMVS2 respecto a la mezcla para la combustión de manera que sea más eficiente, así como de la capacitación para la verificación de los gases con el analizador Enerac 500. Además, se contemplan imprevistos equivalentes al 20% del costo inicial, sumando 200 USD. En total, la ejecución del proyecto implica una inversión de 1200 USD.

Tabla 30*Implementación del proyecto mejora eficiencia combustión caldera 600BHP*

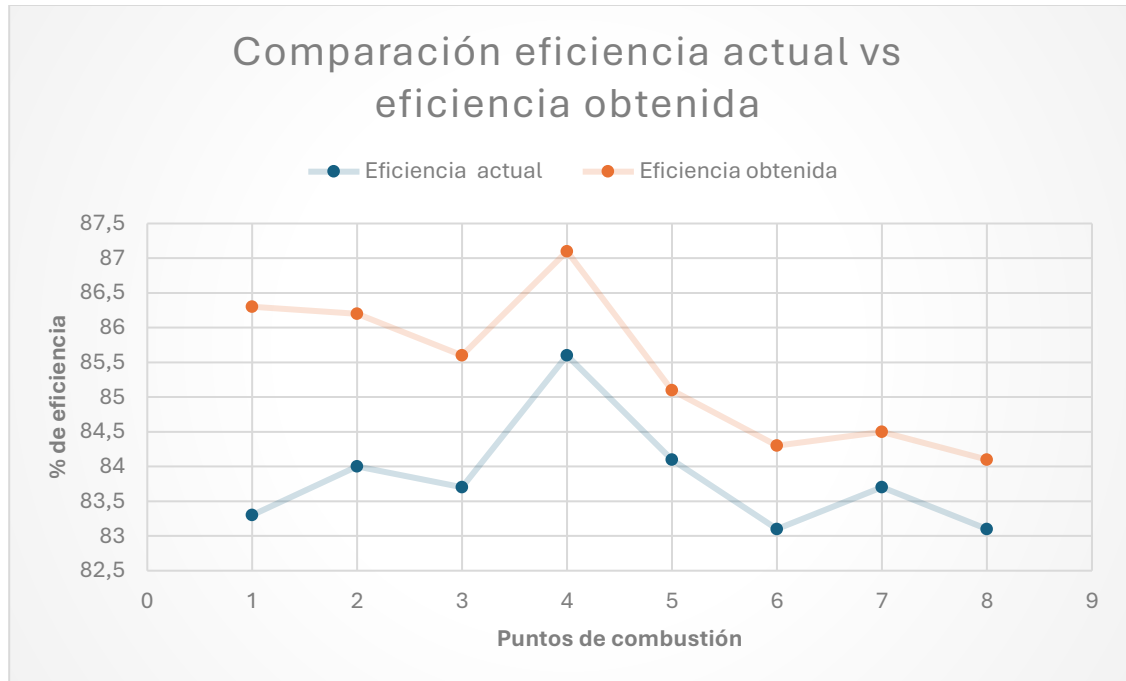
IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO				
MANO DE OBRA				
Especialidad	Personas / días		Costo diario	Costo total
Especialista en	1	1	1000\$US	1000
eficiencia de combustión	1		1000\$US	1000
Módulo de monitorio de gases automático				
			Total	2000\$US
INGENIERÍA E IMPREVISTOS				
Imprevistos		20%		200
			Total	200\$US
COSTOS TOTAL DE IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO			\$US	2200

Nota. Elaboración propia

Como se menciona con anterioridad el conocimiento de uso del analizador ENERAC 500 por parte del personal es de suma importancia ya que permite un análisis más detallado por punto de combustión desde el 1 o punto más bajo hasta el punto 10 siendo el máximo de combustión de la caldera. Esto permite un control de la curva de una manera más detalla y exacta, además permite identificar si existen fallos a general en el sistema ya sea en otros aspectos más mecánicos, entre otros aspectos, en el gráfico 9 se observa la comparación de la curva de combustión al realizar los ajustes en el sistema gracias al Enerac 500.

Gráfico 9

Comparación eficiencia actual vs eficiencia obtenida por ajuste de oxígeno con el Enerac 500



Nota. Elaboración propia

Con base en los cálculos mencionados previamente se logra obtener una nueva relación entre los litros de bunker respecto a la producción por el sistema, esto posterior a la implementación del proyecto y la relación original permitiendo así obtener un aproximado del ahorro. Esto se ve reflejado en la tabla 31.

Tabla 31

Relación de litros toneladas posterior a la implementación del proyecto mejora eficiencia combustión caldera 600BHP

Concepto	Valor
Promedio original	64.8 Lt/T
Relación después de 2 proyectos	64.61 Lt/T
Relación después de 3 proyectos	63.37Lt/T

Nota. Elaboración propia

En la tabla 31 se puede observar un posible ahorro aproximado de 30 705 litros de bunker por mes, siendo esto un 2.06% del total a la hora de implementar el proyecto de mejora planteado.

3.1.9 Trampeo de Vapor

El sistema de trapeo de vapor actual se encuentra un poco descuidado, ya que los equipos no cuentan siquiera con un plaqueo o conocimiento del estatus respectivo de cada trampa, por lo que se procede con el levantamiento de las trampas de vapor de los equipos de la empresa y a la verificación del estado de estas con ayuda de los señores de Monaro soluciones para sistemas de Fluidos, quienes brindaron su ayuda con los equipos como la cámara termográfica y el estetoscopio ultrasónico.

Se obtuvo como resultado del levantamiento, que el sistema cuenta con alrededor de 40 trampas algunas de balde invertido y otras de flotador y termostática, se cuenta con 6 en estado de fuga y 4 obstruidas, que generan pérdidas de vapor de alrededor de 2073.6 kg/ vapor en 8 meses, a su vez se genera una emisión de gases de 444 009 kg CO₂ y alrededor de 165 675 litros de combustible por año. Esto se traduce a una posibilidad de mejora en caso de cambiar las trampas.

En la Tabla 32 se puede observar el listado general de las trampas, enumeradas y con todos los datos requeridos, desde el tipo de trampas, capacidad, diámetro de conexión hasta la marca, el modelo y su estatus según corresponde de acuerdo con las pruebas realizadas a cada una.

Tabla 32

Trampas de Vapor del sistema total de la empresa en estudio

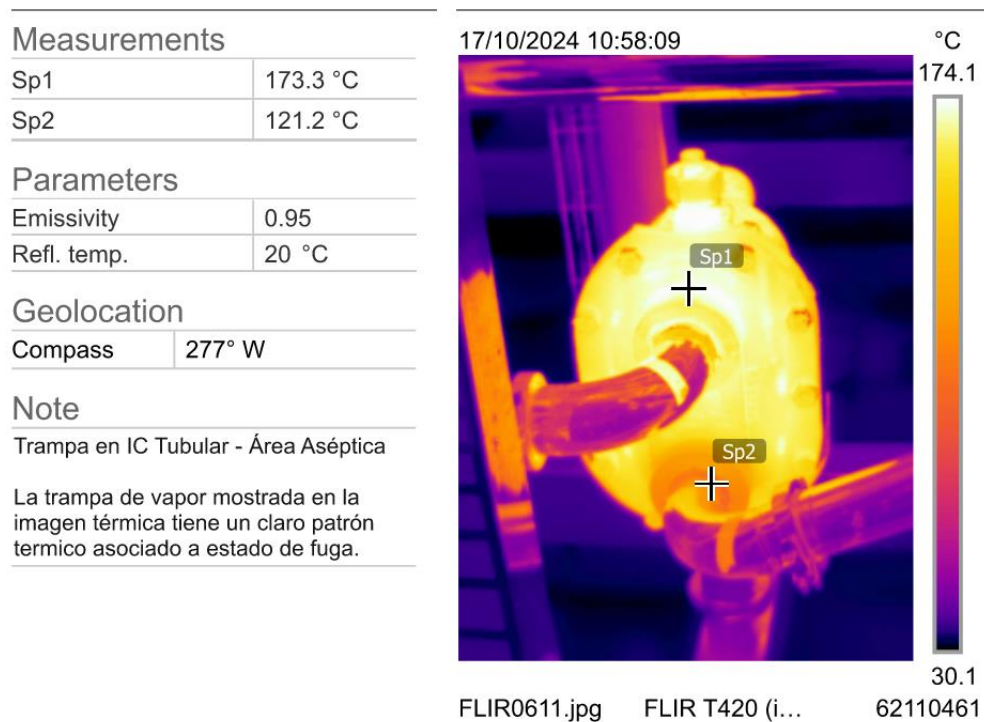
ID	Código de trampa	Área	Ubicación de trampa	Modelo	Tipo	Código Fabricante	Fabricante	Presión de trabajo (psi) ⁽ⁿ⁾	Diám. Conexión (in)	Ofificio (MOP)(psig)	Conexión	Aplicación	Descarga Condensado	Código Cond. OCT 2024	Fecha de revisión	Condición OCT 2024
1	TV1	Cuarto de calderas	Cabezal de calderas	811	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
2	TV2	Cuarto de calderas	Pre calentador de búnker de caldera 600 BHP	812	Balde Invertido	ARM	Armstrong	25	3/4	125	NPT	Proceso	Drenaje	OK	17/10/2024	Buena
3	TV3	Cuarto de calderas	Trampeo previo ERP de pulverización caldera 600 BHP	TD52	Termodinámica	SAR	Spirax Sarco	130	1	600	NPT	Pierna colectoras	Drenaje	LK	17/10/2024	Fuga
4	TV4	Cuarto de calderas	Pre calentador de búnker de caldera 350 BHP	811	Balde Invertido	ARM	Armstrong	25	3/4	125	NPT	Proceso	Drenaje	OK	17/10/2024	Buena
5	TV5	Cuarto de calderas	Trampeo previo ERP de pulverización caldera 350 BHP	TD52	Termodinámica	SAR	Spirax Sarco	130	1	600	NPT	Pierna colectoras	Drenaje	OK	17/10/2024	Buena
6	TV6	Cuarto de calderas	Trampeo previo ERP de pre calentador caldera 350 BHP	TD52	Termodinámica	SAR	Spirax Sarco	130	1	600	NPT	Pierna colectoras	Drenaje	OK	17/10/2024	Buena
7	TV7	Cuarto de calderas	Pre calentador de búnker de caldera 250 BHP	CD33	Termodinámica	ARM	Armstrong	25	1	600	NPT	Proceso	Drenaje	OK	17/10/2024	Buena
8	TV8	Cuarto de calderas	Trampeo previo ERP de pre calentador caldera 250 BHP	TD52	Termodinámica	SAR	Spirax Sarco	130	1	600	NPT	Pierna colectoras	Drenaje	OK	17/10/2024	Buena
9	TV9	Clarificado	Intercambiador de calor tubular 1	FT-125	Flotador y termostática	SAR	Spirax Sarco	130	2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	OOS	17/10/2024	Fuera de servicio
10	TV10	Clarificado	Intercambiador de calor tubular 2	FT-125	Flotador y termostática	SAR	Spirax Sarco	130	2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	OOS	17/10/2024	Fuera de servicio
11	TV11	Clarificado	Trampeo previo ERP bomba mecánica	TVS-811	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
12	TV12	Clarificado	Trampeo previo ERP concentrador de placas	TVS-812	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
13	TV13	Clarificado	Trampeo previo ERP concentrador de placas	TVS-812	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
14	TV14	Área aséptica	Votator 1	125A8	Flotador y termostática	ARM	Armstrong	80	2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
15	TV15	Área aséptica	Votator 2	125A8	Flotador y termostática	ARM	Armstrong	80	2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
16	TV16	Área aséptica	Votator 3	125A8	Flotador y termostática	ARM	Armstrong	80	2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
17	TV17	Área aséptica	Votator 4	125A8	Flotador y termostática	ARM	Armstrong	80	2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	LK	17/10/2024	Fuga
18	TV18	Área aséptica	Votator 5	125A6	Flotador y termostática	ARM	Armstrong	80	1 1/2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
19	TV19	Área aséptica	Votator 6	FT-125	Flotador y termostática	SAR	Spirax Sarco	80	1 1/2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	LK	17/10/2024	Fuga
20	TV20	Área aséptica	Intercambiador de calor tubular	125JD8	Flotador y termostática	ARM	Armstrong	130	2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	LK	17/10/2024	Fuga
21	TV21	Área aséptica	Separador ERP Intercambiador de calor tubular	TVS-812	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
22	TV22	Llenado	Trampeo previo ERP llenadora 1	TVS-811	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	CLG	17/10/2024	Obstruida
23	TV23	Llenado	Trampeo previo ERP llenadora 3	TVS-811	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	CLG	17/10/2024	Obstruida
24	TV24	Llenado	Trampeo previo ERP llenadora 2	TVS-811	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
25	TV25	Llenado	Trampeo previo ERP CIP de banano	TVS-811	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	CLG	17/10/2024	Obstruida
26	TV26	Llenado	Intercambiador de calor CIP de banano	125A8	Flotador y termostática	ARM	Armstrong	80	2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
27	TV27	Llenado	Intercambiador de calor tubular de llenado	125JD8	Flotador y termostática	ARM	Armstrong	80	2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
28	TV28	Llenado	Trampeo previo ERP intercambiador de calor tubular de llenado	FT-125	Flotador y termostática	SAR	Spirax Sarco	130	1	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
29	TV29	Banano	Trampeo previo ERP vapor culinario	TVS-811	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
30	TV30	Banano	Trampeo previo ERP intercambiador de calor tubular de banano	TVS-811	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
31	TV31	Banano	Intercambiador de calor de placas para IC tubular de banano	FT-125	Flotador y termostática	SAR	Spirax Sarco	80	1 1/2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
32	TV32	Evaporadores	Trampeo previo vapor motriz ERP bomba mecánica 1	TVS-812	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
33	TV33	Evaporadores	Pierna colectoras tubería de alimentación de evaporador 1	TVS-812	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
34	TV34	Evaporadores	Pierna colectoras flash cooler evaporador 1	TVS-812	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
35	TV35	Evaporadores	Pierna colectoras paso 1 evaporador 1	125JD8	Flotador y termostática	ARM	Armstrong	130	2	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
36	TV36	Evaporadores	Pierna colectoras sobre paso 6 evaporador 1	TVS-811	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	CLG	17/10/2024	Obstruida
37	TV37	Evaporadores	Trampeo previo vapor motriz ERP bomba mecánica 2	TVS-812	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
38	TV38	Evaporadores	Pierna colectoras tubería de alimentación de evaporador 2	TVS-811	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
39	TV39	Evaporadores	Pierna colectoras punto final tubería de alimentación evaporador 2	811	Balde Invertido	ARM	Armstrong	130	3/4	125	NPT	Pierna colectoras	Ret. Condensado	OK	17/10/2024	Buena
40	TV40	Evaporadores	Pierna colectoras trampa F&T paso 1 evaporador 2	FT-125	Flotador y termostática	SAR	Spirax Sarco	130	3/4	125	NPT	Proceso	Ret. Condensado	LK	17/10/2024	Fuga

Nota. Elaboración propia

Dentro de las trampas que se encuentran en estatus de fuga o bien obstruidas se cuenta con 10 trampas, dentro del análisis se desarrollaron verificaciones con cámaras termográficas que permiten demostrar este estado, por ejemplo, la TV20 ubicada en el área aséptica, en la conexión del intercambiador de calor tubular, es una trampa de flotador y termostática marca Armstrong con un orificio de 125psig con una presión de trabajo 130 psig. En la ilustración 16, la cual muestra un patrón térmico de estado de fuga.

Ilustración 16

Captura térmica de la Trampa TV20 línea aséptica de intercambiador de calor tubular



Nota. Fuente Monaro (2024)

Para calcular las pérdidas de vapor debido a las trampas en fuga, se utiliza la estimación basada en la presión de operación basada en su tipo y condiciones de operación. La fórmula más comúnmente usada es:

$$\text{Pérdida de vapor} \left(\frac{kg}{h} \right) = \text{Caudal} \times \text{fuga} \times \text{Tiempo de operación}$$

$$\text{Pérdida de vapor} \left(\frac{kg}{h} \right) = \frac{40kg}{h} \times 8760h$$

$$\text{Pérdida de vapor} \left(\frac{kg}{h} \right) = 350\,400kg/año$$

El caudal específico de vapor por cada trampa puede no estar directamente especificado, sin embargo, este depende del tamaño y la capacidad de la trampa de vapor por lo que se asume un caudal estándar para trampas de vapor según su tipo y el tamaño de conexión, por ejemplo, un valor de 20 kg/h para trampas más pequeñas (como las de 3/4" a 1") y de 40 kg/h para trampas más grandes (como las de 2" a 3"). Además, considerando que las trampas con fugas están operando durante todo el año (365 días), y usando el caudal de vapor promedio mencionado, se puede calcular la pérdida de vapor anual para cada trampa, con un tiempo de operación de 24h los 365 días del año para un total de 8760h.

Para el cálculo de las trampas de menor caudal por ejemplo la trampa TV22, trampeo previo ERP llenadora 1, de tipo balde invertido marca Armstrong diámetro de conexión 3/4 se encuentra en estado de obstrucción para esta se toma en cuenta un caudal de 10 kg/h y en la ilustración 17 este estado.

Ilustración 17

Captura térmica de la trampa TV22 EPR ubicada en la llenadora 1 en obstrucción



Nota. Fuente Monaro (2024)

Para el desarrollo del cálculo del estado de la trampa con base en los datos obtenidos tanto por la captura termográfica como la información suministrada por Monaro del estado de esta se realiza el cálculo de pérdida de vapor con base en la siguiente ecuación:

$$\text{Pérdida de vapor} \left(\frac{kg}{h} \right) = \text{Caudal} \times \text{fuga} \times \text{Tiempo de operación}$$

$$\text{Pérdida de vapor} \left(\frac{kg}{h} \right) = 10kg/h \times 8760h$$

$$\text{Pérdida de vapor} \left(\frac{kg}{h} \right) = 87\,600kg/año$$

Con base en los cálculos realizados se obtienen las pérdidas de las 10 trampas de vapor la cual se muestra en la tabla 33.

Tabla 33

Representación de Pérdidas de vapor kg/año

Pérdidas por trampas de vapor en mal estado (8 meses)				
Código	Estado	Pérdida Vapor (kg)	Litros de Búnker	CO₂ (kg)
TV3	Fuga	282,762	≈ 22,601	≈ 70,338
TV4	Fuga	282,762	≈ 22,601	≈ 70,338
TV17	Fuga	377,016	≈ 30,144	≈ 93,762
TV19	Fuga	282,762	≈ 22,601	≈ 70,338
TV20	Fuga	377,016	≈ 30,144	≈ 93,762
TV40	Fuga	94,254	≈ 7,533	≈ 23,446
TV22	Obstruida	94,254	≈ 7,533	≈ 23,446
TV23	Obstruida	94,254	≈ 7,533	≈ 23,446
TV25	Obstruida	94,254	≈ 7,533	≈ 23,446
TV36	Obstruida	94,254	≈ 7,533	≈ 23,446
Total		2,073,600	165,675	515,911

Nota. Elaboración propia

Con base en las pérdidas actuales de vapor generadas por las trampas en mal estado, se estima que al corregir dichas fugas el sistema podría evitar el consumo innecesario de aproximadamente 110,450 litros de combustible en un período de 8 meses. Esto representa un ahorro económico cercano a los ₡28,768,830 colones, equivalentes a unos USD 57,538, tomando como referencia un costo de ₡260,53 por litro de búnker y un tipo de cambio de ₡500 por dólar, esto se representa en la tabla 31.

Tabla 34

Posibles ahorros obtenidos por la implementación del cambio de trampas de vapor

POSIBLES AHORROS OBTENIDOS IMPLEMENTACIÓN CAMBIO DE TRAMPAS			
Energía	Ahorro Energético	Ahorro económico	% de ahorro
Eléctrica	0,0kWh/año	0,0 US\$/año	0,00%
Búnker	165,675 litros/8 mese	86 369 US\$/8 meses	11.11%
	Total	86 369 US\$/ 8 meses	
	Mitigación de emisiones CO2	444 009kg/8 meses	
COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN			
	Compra de equipos y materiales		10373,03US\$
	Mano de obra		415US\$
	Otros		0US\$
	Subtotal		10788,03US\$
	Ingeniería 0%		0US\$
	Inspección 0%		0US\$
	Imprevistos 10%		1078US\$
	Total		11866,03US\$

Nota. Elaboración propia.

Con base en los cálculos determinados previamente se procede con la tabulación de estos, lo que permite una verificación de los posibles ahorros lo que permitió reflejar un ahorro energético significativo en el consumo de búnker, equivalente a 165 675litros/ en 8 meses, lo que se traduce en un ahorro económico de 43 184 267 colones o 86 369 \$UD anuales, correspondiente al del consumo actual. Si bien no se registraron ahorros en energía eléctrica, la mitigación ambiental también es destacable, con una reducción de 515 911 kg de CO₂ por año.

Para la implementación del proyecto se plantea el cambio de las trampas actuales por nuevas utilizando el mismo código y marca, para el desarrollo de esto se creó una cotización por cada trampa de vapor proveniente de Estados Unidos y se contempló un 30% como gastos para la exportación, además se contempla la mano de obra de 2 técnicos mecánicos que desarrollen el cambio de las 10 trampas en un aproximado de 3 días de trabajo. Además, se toma en cuenta un 10% del subtotal como imprevisto en caso de algún percance.

En la tabla 35 se explica de una mejor manera el costo de la implementación del proyecto contemplando todo lo antes mencionado.

Tabla 35

Implementación del proyecto cambio de trampas de vapor

IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO			
EQUPOS Y MATERIALES			
Descripción	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Trampa TD52 Spirax Sarco	\$401,70	2	\$803,40
Trampa 125A8 Armstrong	\$1914,61	1	\$1914,61
Trampa FT-125 Spirax Sarco	\$1232,68	2	\$2465,36
Trampa 125JD8 Armstrong	\$2838,16	1	\$2838,16
Trampa TVS-811 Armstrong	\$289,536	4	\$1158,144
		Subtotal	\$9179,674
		Impuestos 13% IVA	\$1193.357
		Total	\$10373,03
MANO DE OBRA			

Especialidad	Personas / días	Costo diario	Costo total
Técnico Mecánico	2 3	138,46	415,38
		Total	\$415,38
INGENIERÍA E IMPREVISTOS			
Imprevistos	10%		\$1078
		Total	\$11866
COSTOS TOTAL DE IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO			\$11866

Nota. Elaboración propia

Con base en los cálculos mencionados previamente se logra obtener una nueva relación entre los litros de bunker respecto a la producción por el sistema, esto posterior a la implementación del proyecto y la relación original permitiendo así obtener un aproximado del ahorro. Esto se ve reflejado en la tabla 36.

Tabla 36

Relación de litros toneladas posterior a la implementación del proyecto implementación del cambio de trampas de vapor.

Concepto	Valor
Promedio original	64.8 Lt/T
Relación después de 4 proyectos	63.1 Lt/T
Relación después de 5 proyectos (con trampas)	56.13 Lt/T
Ahorro total acumulado en litros (8 meses)	206,838 litros aprox.

Nota. Elaboración propia

En la tabla 36 se puede observar un posible ahorro aproximado de 165 675 litros de bunker por mes, siendo esto un 11.11% del total a la hora de implementar el proyecto de mejora planteado. Además de como la relación de litros/ toneladas de producción, disminuye a 56.13 Lt/T.

3.1.10 Vapor Flash

La recuperación de vapor flash es un proceso crucial en la optimización de la eficiencia energética en instalaciones industriales que operan con sistemas de vapor. El vapor flash se produce cuando el condensado, que se encuentra a una presión elevada, es descargado a una presión inferior, liberando parte de su energía térmica en forma de vapor.

Por ejemplo, en un sistema que opera a 4 bar, si se descargan 1000 kg/h de condensado a presión atmosférica, se generarán aproximadamente 100 kg/h de vapor flash, lo que representa un 10% del condensado transformado en vapor debido al descenso de presión.

Para el cálculo del vapor flash en el sistema actual de la empresa analizada, se contempla principalmente la zona de evaporadores que contempla alrededor del 42% de consumo del vapor producido, en este caso un total de 3064405,6lb/ mes o bien 1 390 757.94 kg/mes, y se cuenta con una pérdida de vapor de alrededor de 1,267,468.38 lb/mes (15% del total producido).

El vapor flash se genera cuando el condensado, que sale de las trampas, pasa de una presión elevada (130 psig) a una presión reducida, lo que genera vapor adicional. En general, se asume que entre el 1% y el 5% del condensado se convierte en vapor flash al pasar de 130 psig a presión atmosférica. Para efectos del cálculo se utiliza un promedio de 2% del vapor consumido en los evaporadores como una suposición razonable para la recuperación de vapor flash. Esto se basa en la premisa de que una fracción del vapor condensado generado en las trampas de los evaporadores se transforma en vapor flash por tanto se realiza el siguiente cálculo:

$$\text{Vapor flash recuperable} = 0.02 \times 3\,064\,405.6 \frac{\text{lb}}{\text{mes}} = 61\,288.11 \text{ lb/mes}$$

Este valor se convierte a kilogramos aplicando el factor de conversión 1 lb = 0.4536 kg, obteniendo un total de 27,825.73 kg/mes de vapor flash recuperado. Para cuantificar su volumen en términos de capacidad útil, y considerando una densidad del vapor a 130 psig de 0.6 kg/m³, se obtiene un volumen aproximado de 46,376.22 m³/mes de vapor aprovechable.

Cuando se menciona el vapor flash recuperable es vapor que no necesita ser generado por las calderas, lo que implica un ahorro en el consumo de combustible bunker, actualmente se cuenta con un consumo de bunker de 243,787.69 litros/mes. De manera aproximada, 1 litro de bunker genera 3.6 kg de vapor, se puede calcular la cantidad de bunker ahorrado con base en la siguiente ecuación:

$$\text{litros de bunker necesario} = \frac{27\,825.73 \text{ kg/mes}}{3.6 \text{ litro}} = 7\,725.48 \text{ litros /mes}$$

Este es el volumen de bunker que se ahorra al recuperar el vapor flash. Se procede con el posible ahorro económico al calcular los litros de bunker respecto al costo en colones que es ₡260.53 por litro.

$$\text{ahorro mensual} = 7\,725.48 \text{ litros/mes} \times 260.53 \text{ ₡/litro} = ₡2\,010\,902$$

Así mismo se determina el ahorro económico anual

$$\text{ahorro anual} = 2\,010\,902 \times 12 = 24\,130\,832.64$$

Además, se determina la reducción de emisiones de CO₂ (kg/año):

$$\text{Emisiones evitadas} = 7\,725.48 \frac{\text{litros}}{\text{mes}} \times 3.6 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{litro}} \times 12 \text{ meses}$$

$$\text{Emisiones evitadas} = 27\,825.73 \text{ kg CO}_2/\text{año}$$

En la tabla 37 se determinaron los datos de la situación actual del sistema de vapor y los parámetros básicos de vapor y condensado, así como las especificaciones del sistema.

Tabla 37*Parámetros del sistema para cálculo de recuperación de Vapor Flash*

Parámetros del sistema para cálculo de recuperación de Vapor Flash		
Parámetro	Valor	Descripción
Presión inicial del condensado (psig)	130 psig	Presión a la que sale el condensado de la trampa
Presión final del condensado (psig o atm)	0 psig (atm)	Presión a la que se descarga el condensado (atmosférica)
Temperatura del condensado (°C)	143°C	Temperatura correspondiente a la presión inicial
Cantidad de condensado (kg/h)	1200 kg/h	Flujo promedio de condensado por hora
Porcentaje estimado de vapor flash (%)	2%	Estimación estándar: 1% a 5% dependiendo del sistema
Vapor flash generado (kg/h)	24 kg/h	Cálculo: % vapor flash x cantidad de condensado (2% x 1200 kg/h)
Horas de operación mensual	720 horas	Horas promedio de operación por mes
Total vapor flash mensual (kg/mes)	27,825.73 kg/mes	Vapor flash mensual dado directamente
Relación generación vapor por litro de búnker (kg/l)	3.6 kg/litro	Referencia para calcular búnker ahorrado
Búnker ahorrado (litros/mes)	7,725.48 litros/mes	Vapor flash mensual dividido entre kg/litro de búnker (27,825.73 kg/mes ÷ 3.6 kg/litro)

Nota. Elaboración propia

Con base en los parámetros obtenidos se desarrolla el cálculo de los posibles ahorros a obtener en caso de implementar el proyecto. Obteniendo como resultado un 3.16% esto alrededor de \$40 218.05 anuales o bien ₡24 130 832.64 anuales. Esto se ve reflejado en la tabla 38 de posibles ahorros.

Tabla 38

Posibles ahorros obtenidos por la implementación del proyecto de recuperación de vapor flash

POSIBLES AHORROS OBTENIDOS IMPLEMENTACIÓN RECUPERACIÓN VAPOR FLASH			
Energía	Ahorro Energético	Ahorro económico	% de ahorro
Eléctrica	0,0kWh/año	0,0 US\$/año	0,00%
Búnker	7 725,48 litros/año	40,218.05US\$/año	3,16%
	Total	40,218.05US\$/año	
	Mitigación de emisiones CO2	27 825,73kg/año	3,16%
COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN			
	Compra de equipos y materiales		33900US\$
	Mano de obra		2540US\$
	Otros		0US\$
	Subtotal		36440US\$
	Ingeniería 0%		0US\$
	Inspección 0%		0US\$
	Imprevistos 10%		3644US\$
	Total		40084US\$

Nota. Elaboración propia

La implementación del proyecto contempla una inversión inicial detallada en equipos y materiales esenciales para la eficiencia térmica y energética del sistema de vapor. Dentro de los componentes más relevantes se encuentran las válvulas de control, necesarias para modular el flujo de condensado y vapor en diferentes secciones del sistema, con un costo total de \$2,500. Asimismo, la adquisición de un aproximado de 200 metros de tuberías y conexiones, indispensables para el transporte del vapor y condensado, representa un desembolso significativo de \$10,000. El aislamiento térmico, con un valor de \$1,500, es fundamental para minimizar las pérdidas de calor durante el transporte del vapor.

Otro componente esencial son las trampas de vapor, con un costo de \$1,000, las cuales permiten extraer el condensado sin liberar vapor útil, mejorando la eficiencia del sistema. Finalmente, el núcleo del proyecto es la instalación de un sistema de recuperación de vapor

flash, valorado en \$15,000, el cual permite reaprovechar el vapor generado por la despresurización del condensado, traducéndose en un ahorro sustancial de energía y combustible.

En términos de mano de obra, el proyecto requiere la intervención de técnicos mecánicos y personal de instalación durante 7 días, así como ingeniería de diseño para la correcta integración del sistema. El total de costos laborales asciende a \$2,540, lo cual es razonable considerando la naturaleza especializada de la instalación.

Adicionalmente, se ha contemplado un 10% para imprevistos sobre el subtotal del proyecto, lo cual es una buena práctica de ingeniería que eleva el costo total de implementación a \$40,084. Esta inversión permite no solo reducir el consumo de combustible búnker mediante la recuperación de vapor flash, sino también optimizar la eficiencia energética, mejorar la sostenibilidad del sistema y reducir las emisiones de CO₂, lo cual es clave para cumplir con los estándares ambientales actuales. Esto se puede observar en la Tabla 39.

Tabla 39*Implementación del proyecto de recuperación de vapor flash*

IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO			
EQUIPOS Y MATERIALES			
Descripción	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Valvulas de control	500	5	\$ 2 500,00
Tuberías y conexiones			\$ 10 000,00
Aislamiento			\$ 1 500,00
Trampas de vapor			\$ 1 000,00
Sistema de recuperación de vapor flash			\$ 15 000,00
		subtotal	\$ 30 000,00
		Impuestos 13%	\$ 3 900,00
		Total	\$ 33 900,00
MANO DE OBRA			
Especialidad	Personas / día	Costo diario	Costo total
Técnico Macánico	2 7	160	\$ 1 120,00
Ingeniero de diseño	1 3	100	\$ 300,00
sonal de instalación	2 7	160	\$ 1 120,00
		Total	\$ 2 540,00
INGENIERÍA E IMPREVISTOS			
Imprevistos	10%		\$ 3 644,00
		Total	\$ 40 084,00
COSTOS TOTAL DE IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO			\$40084

Nota. Elaboración propia

Con base en los cálculos mencionados previamente se logra obtener una nueva relación entre los litros de bunker respecto a la producción por el sistema, esto posterior a la implementación del proyecto y la relación original permitiendo así obtener un aproximado del ahorro. Esto se ve reflejado en la tabla 40.

Tabla 40

Relación de litros toneladas posterior a la implementación del proyecto recuperación de vapor flash

Concepto	Valor
Promedio original	61.14 Lt/T
Relación después de 3 proyectos	63.37Lt/T
Relación después de 4 proyectos	63.1 Lt/T
Ahorro acumulado en litros (8 meses)	41,163 litros aprox.

Nota. Elaboración propia

En la tabla 40 se puede observar un posible ahorro aproximado de 5150 litros de bunker por mes, siendo esto un 0.35% del total a la hora de implementar el proyecto de mejora planteado, una relación de 59.45Lt/L.

3.2 Monitoreo periódico de parámetros de operación de la caldera

La generación de vapor como se ha visto a lo largo del proyecto representa uno de los procesos con mayor importancia y energéticamente más intensivo en la operatividad del centro de producción, por lo que contar con una herramienta que permita la identificación y monitoreo de parámetros de la caldera es fundamental para la operación eficiente, segura, sostenible y sobre todo mantener los aspectos de eficiencia de combustión indicados en este proyecto.

La eficiencia de combustión de la caldera de vapor, además de depender de un dispositivo como el Enerac 500 para poder medir y controlar la cantidad de oxígeno en la combustión, hay ciertos factores de los cuales la caldera depende para su correcta operación y ajustes de eficiencia de combustión, los cuales vienen indicados por manuales de operación de la caldera y experiencia técnica del personal que la opera.

Entre los factores esenciales para garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de la caldera se encuentran:

1. Presión y temperatura de vapor: Se debe de mantener dentro del rango operativo para evitar daños o ineficiencia; además, es el encargado de controlar la producción de energía térmica. Esto se monitorea a través de los manómetros y termómetros colocados en la entrada y salida de la tubería de vapor.
2. Nivel de agua en el visor: Se debe de revisar que la caldera permanezca con agua y no trabaje en seco, ya que esto puede dañar la caldera. A pesar de que la caldera cuenta con un sensor indicador de nivel del agua, el mismo puede fallar y requiere la revisión en campo.
3. Presión de agua de alimentación: Esta presión es la que se encarga de que exista un flujo continuo y estable. Esta presión debe de ser inferior a la del interior de la caldera.
4. Presión de combustible bunker: Para el correcto flujo y combustión del combustible, este se debe de precalentar a una temperatura aproximada entre 100 y 130°C.
5. Relación de aire-combustible: Se debe de monitorear la correcta operación del servomotor que controla la relación del aire y combustible de combustión.
6. Temperatura de gases de escape: Monitorear la temperatura de salida de gases de combustión permite identificar la transferencia de calor.



7. Presión de aire para combustión: Asegura un flujo correcto, continuo y con buena relación con el combustible.
8. Presencia de llama: Se debe de revisar la correcta presencia de llama, caso contrario el sistema debe de apagar de forma automática.
9. Funcionamiento del sistema de purga: Elimina sedimentos que se acumulan y reducen la transferencia de calor.
10. Sistemas de seguridad: Alarmas que deben de activarse o apagar la caldera por bajo nivel de agua, alta presión de vapor, baja presión de vapor falla de llama, alta temperatura de vapor, baja presión de combustible, baja presión de aire, entre otros.
11. Consumo de combustible: Mediante un flujómetro se debe de mantener control del consumo de combustible, un aumento o disminución no controlado puede indicar el mal funcionamiento de la caldera.
12. Horímetro: Indicador que permite la programación de mantenimientos en la caldera.

(Adaptado de Cleaver-Brooks, S.f)

Tomando en cuenta los parámetros recomendados por el fabricante, se realizó una lista con los parámetros que deben de ser revisados y el rango recomendado como se muestra en la Figura 18.

Ilustración 18

Registro de Recorrido de Parámetros Caldera de Vapor 600 BHP

 Registro de Recorrido Parámetros Caldera Vapor Cleaver Brooks 600 BHP 			
Inspector:		Fecha:	
Parámetro a Verificar	Rango Esperado / Recomendado	Cumple (Si / No)	Observaciones
Presión de Vapor	100 - 150 Psi		
Temperatura de Vapor	170 - 190 °C		
Presión del Agua de Alimentación	10 - 20 Psi por encima de presión de Vapor		
Nivel de Agua en el Visor	1/2 a 3/4		
Presión del Combustible Bunker	100 - 180 Psi		
Temperatura del Combustible Bunker	90 - 130 °C		
Presión del Aire de Combustión	5 - 15 inH2O		
Presión del Atomizador (Si Aplica)	80 - 150 Psi		
Eficiencia de Combustión	Enerac 500		
Presión de Gases de Escape	0,1 - 0,5 inH2O		
Temperatura de Gases de Escape	200 - 300 °C		
Presencia y Estabilidad Llama	Presente - Estable		
Funcionamiento de Purgas	Operativo - Sin Obstrucciones		
Presión de Vapor Auxiliar (Si Aplica)	100 - 150 Psi		
Estado de Alarmas Activas	Sin Activar		
Consumo de Combustible (Referencia)	120 - 150 gal/hr (Según Carga)		
Registro de Horas de Operación	NA		



Nota. Adaptado de (Cleaver-Brooks, S.f)

Ahora bien, al tener una lista de lo recomendado por el fabricante de las inspecciones que se deben de realizar para asegurar el correcto funcionamiento de la caldera y poder controlar de forma correcta la eficiencia de la combustión por medio de la medición con el Enerac 500, se logra asegurar la correcta operación de este proyecto en la modificación de la eficiencia de combustión por medio del análisis de los datos obtenidos desde el Enerac 500 y reflejado en el ajuste que se realiza en el controlador de la caldera de la marca Siemens sin interrupciones o factores externos que lo alteren.

Teniendo en cuenta la correcta operación de la caldera, el fabricante hace un llamado a realizar una serie de mantenimientos diarios, semanales, mensuales, trimestrales, semestrales y anuales; los cuales se recuperaron tal cual se muestra en la Figura 19

Ilustración 19

Programa Mantenimiento Programado Caldera de Vapor Cleaver Brooks 600BHP

 Programa de Mantenimiento Programado Caldera Cleaver Brooks 600 BHP 	
<p style="text-align: center;">Mantenimiento Diario</p> <p>Verificar nivel de agua y funcionamiento de visores. Verificar presión y temperatura del vapor. Comprobar funcionamiento del quemador y llama. Verificar temperatura del combustible. Confirmar presión de aire y buen atomizado del bunker. Inspeccionar válvulas de seguridad visualmente (sin pruebas). Revisar ruidos o vibraciones anómalas.</p> <p>Purgar el fondo de la caldera y los separadores. Verificar registros de alarmas.</p> <p style="text-align: center;">Mantenimiento Semanal</p> <p>Probar manualmente el corte por nivel bajo de agua. Verificar el funcionamiento de la válvula de seguridad (sin descargarla). Inspeccionar filtros de combustible y aire. Revisar estado de electrodos e ignición. Limpiar el visor de nivel.</p> <p style="text-align: center;">Mantenimiento Mensual</p> <p>Probar válvulas de seguridad con carga simulada (si lo permite). Revisar estado de tuberías y válvulas de vapor y agua. Verificar funcionamiento del control de presión diferencial del agua de alimentación. Limpieza del quemador y boquillas. Medir emisiones de gases. Calibración básica de sensores de presión y temperatura.</p>	<p style="text-align: center;">Mantenimiento Trimestral</p> <p>Limpieza interna del precipitador o intercambiador de gases. Revisión general de sistema de combustión y control. Limpieza y ajuste de electrodos y boquillas del quemador. Inspección interna rápida de la cámara de combustión. Verificación y limpieza de sensores.</p> <p style="text-align: center;">Mantenimiento Anual</p> <p>Inspección visual interna completa (cuerpo de presión y cámara de combustión). Prueba hidrostática (si aplica según normativa). Calibración de todos los instrumentos de control. Prueba de eficiencia térmica (rendimiento). Análisis de gases de combustión. Inspección y limpieza profunda de tuberías, filtros, válvulas y accesorios. Verificación y ajuste de automatismos (PLC, sensores, alarmas). Revisión general de sistema eléctrico y de control.</p>

Nota. Adaptado de (Cleaver-Brooks, S.f)

Por medio de este programa de mantenimiento es posible mantener un control periódico sobre los componentes más importantes para la operación segura y eficiente de la caldera de vapor. Asimismo, se garantiza que cualquier ajuste en la relación aire-combustible no se vea afectado por fallos ajenos, como problemas mecánicos, eléctricos o de operación. Además, la integración de este programa de mantenimiento, los recorridos de revisión de parámetros y la optimización de la combustión, permite asegurar que la caldera opere dentro de los rangos recomendados y facilitando la documentación de las condiciones operativas, lo cual servirá como respaldo técnico para la toma de decisiones futuras en procesos de mejora continua.

3.3 Resultados del análisis de datos al implementar los proyectos planteados

La implementación de los proyectos propuestos se diseñó para optimizar el consumo de búnker y mejorar la eficiencia operativa. Los resultados obtenidos durante el periodo de enero a agosto demuestran un impacto significativo en el ahorro de litros de búnker, la reducción porcentual del consumo total y una mejora notable en la relación litros por tonelada (Lt/T) global acumulada.

A continuación, se presenta una tabla comparativa que detalla el ahorro en litros por cada proyecto individual, esto se ve en la tabla 41.

Tabla 41

Tabla Comparativa de ahorro en litros y mejora en relación Lt/T por Proyecto (Enero-Agosto)

Tabla Comparativa: Ahorro en Litros y Mejora en Relación Lt/T por Proyecto (Enero-Agosto)			
Proyecto	Ahorro en litros (8 meses)	% Ahorro sobre litros originales (1,492,008 L)	% Mejora acumulada en la relación Lt/T
1. Aislamiento Tuberías Aséptico/Clarificado	3,686	0.25%	Pequeña
2. Aislamiento Calefactores + Automatización Búnker	1,622	0.11%	Muy pequeña
3. Eficiencia Combustión Caldera 600BHP	30,705	2.06%	Moderada
4. Recuperación Vapor Flash	5,15	0.35%	Pequeña
5. Corrección Trampas de Vapor	165,675	11.11%	Muy significativa
Total, acumulado (los 5 proyectos)	206,838 litros	13.87%	18.83% de mejora en Lt/T

Nota. Elaboración propia

Además, se representa la comparación litros de combustible /Toneladas de producción esto en la tabla 42:

Tabla 42

Comparación de parámetro Lt/Toneladas

Comparación de parámetro Lt/Toneladas			
Parámetro	Antes de proyectos	Después de proyectos	Variación
Litros consumidos (8 meses)	1,492,008 litros	1,285,170 litros	206,838 litros
Producción total	24,403.16 toneladas	24,403.16 toneladas	Igual
Relación Lt/T	64.87 Lt/T	56.13 Lt/T	8.74 Lt/T
% de mejora en la relación	-	-	18.83% de mejora

Nota. Elaboración propia

Como se observa en la tabla 42 representa los datos recopilados y analizados evidenciando una mejora sustancial en la eficiencia de consumo de búnker. Antes de la implementación de los proyectos, la relación promedio de consumo era de 64.87 Lt/T. Tras la puesta en marcha de los cinco proyectos, esta relación disminuyó a 52.66 Lt/T, lo que representa una mejora total del 18.83% en la eficiencia de consumo por tonelada producida.

En términos de volumen, la aplicación de estos proyectos se tradujo en un ahorro acumulado de 206,838 litros de búnker durante el periodo de enero a agosto. Esto equivale a una reducción del 13.87% del consumo total de búnker registrado antes de las intervenciones. Estos resultados no solo validan la efectividad de las iniciativas planteadas, sino que también resaltan el impacto positivo en la optimización de recursos y la sostenibilidad de las operaciones.

Otro aspecto de importancia que se analizó es el CO₂ evitado con el ahorro de combustible con la implementación de los proyectos planteados, estos se calcularon con un factor de conversión aproximado de 1 litro de búnker \approx 2.68 kg CO₂ esto se refleja en la tabla 43.

Tabla 43

Estimación de CO₂ evitado por proyecto (usando 2.68 kg CO₂ por litro)

Estimación de CO₂ evitado por proyecto (usando 2.68 kg CO₂ por litro)		
Proyecto	Ahorro (litros)	Estimación CO ₂ evitado (kg)
1. Aislamiento Tuberías Aséptico/Clarificado	3,686	9,874 kg
2. Aislamiento Calefactores + Automatización Búnker	1,622	4,348 kg
3. Eficiencia Combustión	30,705	142,824 kg
4. Recuperación Vapor Flash	5,15	27,826 kg
5. Trampas de Vapor	165,675	444,009 kg

Nota. Elaboración propia

Capítulo IV. Cálculo análisis de rentabilidad

Ross, Westerfield y Jaffe (2019) define el análisis de rentabilidad financiera de proyectos, “como herramienta para evaluar los beneficios de los proyectos en relación con los ingresos, activos y capital invertido para el desarrollo de estos”.

En el presente análisis de rentabilidad se establecen algunos indicadores financieros (VAN, TIR, PR y ROI), ya que estos indican la factibilidad de desarrollo y permite un análisis general comparativo del gasto actual de bunker con el ahorro obtenido al implementar las propuestas de mejora, además del ahorro en emisiones de Co2.

Para el 2023 la empresa en estudio realizó un consumo de alrededor de 1 950 301,52 litros de bunker en 8 meses de análisis, esto se traduce alrededor de ¢ 508 112 055 para una producción total de 30 654 850,08 kg de vapor. A partir de las propuestas de mejora por implementar, se obtiene un ahorro aproximado de 202 203 litros de bunker lo que se traduce a un 10.36% de ahorro, o bien ¢ 52 679 947.59 esto es un gran porcentaje de recuperación del dinero invertido ya que actualmente se tiene una pérdida del 15% del vapor producido.

Para un mayor entendimiento la tabla 44 refleja el comparativo de los litros de bunker consumidos por producción, el porcentaje de pérdidas que se tiene actualmente y el ahorro o recuperación de dinero a partir de la implementación de las propuestas de mejora.

Tabla 44

Análisis comparativo de bunker consumido en producción con el posible ahorro por las propuestas de mejora

Análisis comparativo de bunker consumido en producción				
Descripción	Litros por mes	Total, de litros en 8 meses	Costo en colones	Porcentajes
Litros consumidos de bunker para la producción anual de vapor	243787,69	1950301,52	¢ 508 112 055,01	100%
Pérdidas de bunker	57487,08	459896,61	¢ 119 816 863,28	23.58%
Litros totales ahorrados por implementación de proyectos	25275,37	202203	¢ 52 679 947,59	10.36%
Total		202203	¢ 52 679 947,59	

Nota. Elaboración propia

Así mismo, es de gran relevancia determinar los indicadores que reflejan la factibilidad de la inversión por proyecto, así como inversión total, esto con el fin de obtener una referencia del posible ahorro con respecto al gasto actual en combustible, e incluso el ahorro respecto al impacto ambiental, esto se representa en la tabla 45.

Tabla 45

Resumen de Ahorro económico inversión y ahorro CO₂, según cada proyecto a implementar

Estimación de CO ₂ evitado por proyecto (usando 2.68 kg CO ₂ por litro)			Costo dolares		Costo en colones	
Proyecto	Ahorro (litros)	Estimación CO ₂ evitado (kg)	Ahorro US\$	Implementación	Ahorro colones	Implementación
1. Aislamiento Tuberías Aséptico/Clarificado	3686	9874 kg	\$ 1 555	\$ 320	\$ 777 500	\$ 160 050
2. Aislamiento Calefactores + Automatización Búnker	1622	4348 kg	\$ 684	\$ 1 000	\$ 341 995	\$ 500 015
3. Eficiencia Combustión	30705	142824 kg	\$ 19 426	\$ 2 200	\$ 9 712 850	\$ 1 100 000
4. Recuperación Vapor Flash	515	27826 kg	\$ 40 084	\$ 40 218	\$ 20 042 000	\$ 20 109 025
5. Trampas de Vapor	165675	444009 kg	\$ 86 369	\$ 11 866	\$ 43 184 500	\$ 5 933 000
Total	202203	628881	\$ 148 118	\$ 55 604	\$ 74 058 845	\$ 27 802 090

Nota. Elaboración propia

Como se muestra en la tabla 45, la inversión total necesaria para la implementación de los cinco proyectos es de ₡27,802,090, mientras que el ahorro estimado a partir de su ejecución asciende a ₡74,058,845. Uno de los primeros indicadores que puede determinarse es el periodo de recuperación de la inversión (Payback), el cual se calcula dividiendo la inversión total entre el ahorro generado. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$\text{Periodo de recuperación} = \frac{\$27\,802\,090}{\$74\,058\,845} = 0.375 \text{ años}$$

Este resultado indica que la inversión podría recuperarse en aproximadamente 4.5 meses, lo cual representa un tiempo de retorno muy favorable. Este rápido retorno refleja una rentabilidad significativa, especialmente destacada en los proyectos de cambio de trampas de vapor y de mejora en la eficiencia de la combustión de la caldera.

Para complementar este análisis, se calculó el indicador financiero Retorno sobre la Inversión (ROI) para cada uno de los proyectos, el cual permite evaluar la rentabilidad individual de cada intervención. El ROI se expresa como un porcentaje y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$ROI = \left(\frac{\text{Ahorro total anual}}{\text{Inversión total}} * 100 \right)$$

Para el cálculo de la rentabilidad ROI, se implementó el cálculo para cada uno de los proyectos obteniendo como resultado el proyecto con mayor rentabilidad, este es el proyecto de Eficiencias de calderas con un ROI = 883%.

Como tercer indicador financiero se realiza el cálculo del Valor Actual Neto VAN este se calcula con 10 años debido a que es un período suficientemente largo para reflejar la vida útil de muchos proyectos y una tasa del 10% de descuento como tasa base para representar el costo de oportunidad del capital, al realizar el cálculo de todos los proyectos se obtiene como resultado que todos son positivos, lo que indica viabilidad financiera a largo plazo. El proyecto de cambio de trampas de vapor tiene un VAN superior de ¢163 027 siendo este el de mayor viabilidad financiera a largo plazo.

El cuarto indicador financiero es el TIR o Tasa Interna de Retorno, este indicador ayuda a entender mejor la rentabilidad de cada proyecto y a tomar decisiones más informadas sobre cuál es más atractivo desde el punto de vista financiero. En la tabla 46 se observa un resumen de los indicadores financieros.

Tabla 46

Representación indicadores financieros

Proyecto	8 meses					1 año				
	ROI (%)	VAN (¢)	TIR (%)	Payback (años)	Meses	ROI (%)	VAN (¢)	TIR (%)	Payback (años)	Meses
1. Aislamiento Tuberías	485.76	589085.45	711.07	0.14	1.65	728.68	945410.04	726.19	0.14	1.65
2. Aislamiento Calefactores	68.39	-170496,57	-92.96	0.97	11.7	102.6	-13761.87	4.76	0.97	11.7
3. Eficiencia Combustión	883.90	8258508.37	1320.09	0.08	0.91	1324.48	12709861.77	1324.3	0.08	0.91
4. Recuperación Vapor Flash	99.67%	-798191.95	-0.89	0.67	8.03	149.5	8386962.23	81.64	0.67	8.03
5. Trampas de Vapor	727.58%	35676054.48	1085.5	0.09	1.1	1091.8	55467307.39	1091.34	0.09	1.1

Nota. Elaboración propia

Para evaluar la viabilidad económica de los proyectos de eficiencia energética implementados, se calcularon los principales indicadores financieros en dos escenarios: un periodo real de recuperación de 8 meses y un horizonte proyectado de 12 meses. Los indicadores considerados fueron el Retorno sobre la Inversión (ROI), el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación de la inversión (Payback), todos aplicados a cada uno de los proyectos propuestos.

En el escenario de 8 meses, destaca el proyecto de eficiencia en combustión, lo que indica que por cada colón invertido se recuperan más de ocho colones. De igual manera, el proyecto de trampas de vapor presenta un ROI del 727%, consolidándose ambos como las intervenciones con mayor retorno financiero. Al extender el análisis a un periodo de 12 meses, estos indicadores mejoran aún más: el proyecto de eficiencia en combustión eleva su ROI a 1324.5% y el de trampas de vapor a 1091.2%, lo que refleja un mayor aprovechamiento de los beneficios económicos en un periodo de análisis más prolongado.

En cuanto al Valor Actual Neto, que refleja la rentabilidad descontada a una tasa del 10% anual, todos los proyectos obtienen valores positivos tanto en el periodo de 8 como en 12 meses. El proyecto de trampas de vapor genera el mayor VAN en ambos escenarios, seguido por el proyecto de eficiencia en combustión. Esto sugiere que, además de ofrecer un excelente retorno, son los que más valor agregado neto ofrecen al sistema productivo. La Tasa Interna de Retorno también refleja esta tendencia: en los 8 meses analizados, la eficiencia en combustión alcanza una TIR del 723.2%, mientras que el cambio de trampas de vapor llega al 531.9%, lo que indica una altísima rentabilidad. A 12 meses, estas cifras se incrementan, lo que confirma que el beneficio económico se potencia al mantener el ahorro durante más tiempo.

Respecto al periodo de recuperación, el análisis demuestra que los proyectos más rentables también son los que recuperan su inversión en menor tiempo. El proyecto de eficiencia en combustión logra recuperar su inversión en aproximadamente un mes, mientras que el proyecto de trampas de vapor lo hace en poco más de un mes. Por otro lado, los proyectos como el aislamiento de calefactores muestran periodos más largos de recuperación, lo cual no los hace inviables, sino que implica un retorno más pausado en el tiempo.

En resumen, los resultados obtenidos reflejan que todos los proyectos evaluados son financieramente viables, siendo los de eficiencia en combustión y cambio de trampas de vapor los más destacados por su alto retorno económico, rápida recuperación de la inversión y fuerte impacto en la reducción del consumo de combustible. Estos hallazgos respaldan la priorización de estos proyectos dentro de cualquier plan de mejora energética, no solo por sus beneficios operativos, sino también por su contribución significativa a la sostenibilidad ambiental y financiera de la empresa.

Otro aspecto de gran relevancia a analizar es el impacto ambiental generado con la implementación de los proyectos ya que se estima una reducción de emisiones de CO₂ de al menos 628 881 kg/año, tomando en cuenta que los proyectos de mayor relevancia para este impacto es el proyecto de cambio de trampas de vapor y el proyecto de mejora de la eficiencia de combustión de la caldera de 600BHP.

Capítulo V Conclusiones

Durante el análisis energético realizado al sistema de vapor, se identificaron cinco fuentes principales de desperdicio de energía. Entre ellas destacan las pérdidas térmicas ocasionadas por la falta de aislamiento en tuberías y calefactores, las ineficiencias operativas en la combustión de la caldera, el no aprovechamiento del vapor flash generado, las fugas derivadas del mal funcionamiento de las trampas de vapor, y las deficiencias en el control de la automatización en cuanto a la eficiencia de combustión de la caldera del búnker. Cada una de estas fuentes fue cuantificada y posteriormente abordada mediante proyectos específicos orientados a mejorar el sistema, respecto a consumo de combustible en una relación litros con las toneladas de producción, así como la mitigación de CO₂.

Dentro de las principales fuentes que se determinaron a lo largo del análisis implementado se encuentra, el mal diseño y deterioro del material aislante en tuberías del área de clarificado y en las tuberías de los calefactores, en el control de la eficiencia de combustión de las calderas en específico la caldera de 600BHP, un faltante de regulación de la cantidad y estado de las trampas de vapor, así como la no recuperación del vapor flash. Estas fuentes generan alrededor de 459,896.61 litros de búnker en pérdidas, lo que se traduce 19.65 Lt/T, o bien 4,598,966 kg de vapor aproximadamente.

En términos ambientales y económicos, la implementación de las propuestas de mejora permitiría un ahorro total estimado de 202 203 litros de búnker en 8 meses, lo cual se traduce en una reducción aproximada de 628,881 kg de CO₂, esto no solo representa una reducción significativa en la huella de carbono, lo que refuerza el compromiso de la empresa con la sostenibilidad y responsabilidad ambiental, también permite el cumplimiento de las normativas del Reglamento sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Provenientes de Calderas y Hornos de Tipo Indirecto (N° 36551-S-MINAET-MTSS).

Para el análisis de rentabilidad para las propuestas de mejora energética, se evaluaron cinco proyectos mediante los principales indicadores financieros planteados ROI, VAN, TIR y Payback. El resultado de este análisis permitió evidenciar con claridad la viabilidad económica de las propuestas y su alto potencial de recuperación, tanto desde una perspectiva operativa como financiera y ambiental.

La inversión total necesaria para la implementación de los cinco proyectos es de ¢27,802,090, y se estima que generarán un ahorro de ¢74,058,845 en un periodo de 8 meses. Esto representa un retorno del 266% de la inversión inicial y un periodo de recuperación promedio de apenas 4.5 meses. Entre los proyectos analizados, el de eficiencia de combustión destaca por su rentabilidad, con un ROI del 883% a 8 meses y un periodo de recuperación de tan solo 1 mes, mientras que el proyecto de trampas de vapor alcanza un ROI del 727% y se recupera en 1.1 meses.

Así mismo, todos los proyectos presentaron un Valor Actual Neto (VAN) positivo, lo cual indica que son económicamente viables considerando una tasa de descuento del 10%. El proyecto de trampas de vapor mostró el mayor VAN, con ¢4,555,047, seguido por eficiencia de combustión con ¢3,032,299. Además, las tasas internas de retorno (TIR) fueron sumamente altas en ambos casos, con 723.2% y 531.9% respectivamente, lo que reafirma su atractivo financiero.

Por tanto, se concluye que las propuestas de mejora no solo son técnicamente viables, sino que su ejecución resulta altamente rentable, con impacto directo en la sostenibilidad energética, económica y ambiental de la empresa. Estas conclusiones justifican plenamente su implementación, aportando herramientas concretas para la toma de decisiones estratégicas.

Además, para asegurar el cumplimiento de los objetivos, se desarrolló una herramienta de seguimiento en forma de “checklist” o lista para el monitoreo periódico de los parámetros clave de operación de la caldera. Esto permitirá al personal técnico verificar las condiciones operativas y garantizar una producción eficiente, segura y sostenida en el tiempo.

En conclusión, el análisis energético y financiero del sistema de vapor ha demostrado la existencia de oportunidades claras para mejorar el sistema, reducir emisiones y generar ahorros económicos significativos. Estos resultados justifican plenamente la inversión en las medidas propuestas, proporcionando a la empresa una base técnica y financiera sólida para la toma de decisiones en proyectos futuros de eficiencia energética.

Capítulo VI Recomendaciones

A partir del análisis energético y financiero realizado, se recomienda a la empresa implementar de manera prioritaria las medidas con mayor impacto económico y ambiental. En primer lugar, se sugiere ejecutar los proyectos de optimización de la combustión en la caldera y sustitución de trampas de vapor defectuosas, ya que estos presentan los mejores indicadores de rentabilidad (ROI, VAN, TIR) y los periodos de recuperación más cortos. La mejora en la eficiencia de combustión permitirá reducir de forma directa el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, mientras que el reemplazo de trampas de vapor evitará pérdidas innecesarias de vapor, mejorando así el balance energético del sistema.

Posteriormente, se recomienda avanzar con el proyecto de aislamiento de tuberías, debido a su favorable retorno económico y su rápida recuperación de la inversión. Esta medida contribuirá a minimizar las pérdidas térmicas, lo que complementará las mejoras en la generación y distribución del vapor.

La recuperación del vapor flash también debe considerarse dentro de las siguientes fases de implementación. Si bien su periodo de recuperación es más prolongado en comparación con las otras medidas, presenta una TIR positiva y un impacto ambiental importante al reducir el consumo de combustible. Finalmente, el aislamiento de calefactores junto con la automatización del búnker, aunque con un desempeño financiero más moderado, sigue siendo una inversión válida dentro de la estrategia de sostenibilidad y eficiencia energética a mediano plazo.

Además de la ejecución de los proyectos mencionados, es fundamental establecer un plan integral de mantenimiento preventivo y correctivo del sistema de vapor. Este plan debe contemplar la inspección periódica y el mantenimiento regular de las calderas, trampas de vapor, tuberías y sistemas de automatización. La falta de un mantenimiento adecuado puede revertir las ganancias alcanzadas y provocar un incremento en las pérdidas energéticas. Un enfoque estructurado en mantenimiento permitirá prolongar la vida útil de los equipos, reducir el riesgo de fallos no planificados y garantizar un rendimiento energético sostenido.

Otra recomendación clave es la implementación de un sistema de monitoreo y control continuo. La instalación de sensores, medidores de flujo, analizadores de gases y sistemas SCADA o EMS (Energy Management System) permitirá un seguimiento en tiempo real de

los parámetros críticos como presión, temperatura, eficiencia de combustión y consumo de combustible. Esta capacidad de monitoreo facilitará la detección oportuna de desviaciones operativas, permitirá una respuesta rápida ante anomalías y mejorará la toma de decisiones basada en datos.

Finalmente, se destaca la importancia de fortalecer la capacitación del personal técnico y operativo. Un equipo adecuadamente formado en buenas prácticas de operación, mantenimiento y gestión energética es clave para asegurar la sostenibilidad de los resultados. La capacitación debe incluir el manejo de las nuevas tecnologías de monitoreo, técnicas de operación eficiente y protocolos de mantenimiento preventivo. Además, fomentar una cultura organizacional orientada a la eficiencia energética incentivará la participación del personal en la identificación y propuesta de nuevas oportunidades de mejora.

La implementación de estas recomendaciones permitirá a la empresa no solo reducir significativamente sus costos operativos y el consumo de combustible, sino también avanzar en el cumplimiento de sus objetivos de sostenibilidad ambiental. La combinación de acciones orientadas a la inversión en infraestructura, mantenimiento, monitoreo y capacitación consolidará un sistema de vapor más eficiente, rentable y alineado con los estándares de producción más limpia.

Bibliografía

- Botros, K. K. (2006). *Piping systems and pipeline design*. ASME Press.
- Boyce, M. P. (2012). *Principles of Power Systems and Boilers*. Academic Press.
- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. (2018). *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill. <https://ebooks724.utn.elogim.com:443/?il=7013>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (5.a ed.). McGraw-Hill Education
- Chang, R., & Goldsby, K. (2016). *Química* (12.a ed.). McGraw-Hill Education.
- Cleaver-Brooks. (S.f). Manual técnico de operación y mantenimiento de caldera modelo TB-600. [Documento técnico]. Cleaver-Brooks Inc. Retrieved 2025
- Eastop, T. D., & McConkey, A. (1993). *Applied Thermodynamics for Engineering Technologists*. Longman.
- International Organization for Standardization (ISO). (2018). ISO 50001:2018 - Energy management systems – Requirements with guidance for use. ISO.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2010). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. (5a ed.). Wiley.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2014). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (8.a ed.). Wiley.
- Ross, S. A., Westerfield, R. W., & Jaffe, J. F. (2019). *Finanzas corporativas* (12ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Smith, J., Johnson, R., & Brown, T. (2015). *Thermal systems and energy efficiency*. Energy Press.
- TLV. (n.d.). El costo de las pérdidas de vapor. Recuperado de <https://www.tlv.com/es-mx/steam-info/steam-theory/energy-saving/cost-of-steam-trap-losses>

Anexos

1. Memoria de Cálculo:

- a. Aislamiento de tuberías de vapor de aséptico y clarificado

Ilustración 20.

Resistencia en válvulas y accesorios expresada en longitud equivalente

Resistencia en válvulas y accesorios expresada como longitud equivalente L_e/D	
Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de compuerta – Completamente abierta	8
Válvula check – Tipo giratorio	100

Nota. Fuente: Flow of fluids through valves, fitting and pipe, technical paper 410 (2011) Crane Co.

- b. Temperatura de conductividad:

Ilustración 21

Temperatura de conductividad

MEAN TEMP		Thermal Conductivity, k	
°F	°C	BTU in/h ft ² °F	W/m ² °C
0	-18	0.183	0.026
100	38	0.237	0.034
200	93	0.295	0.043
300	149	0.360	0.052
400	204	0.437	0.063
500	260	0.528	0.076
600	316	0.638	0.092
700	371	0.771	0.111
800	427	0.929	0.134

Nota. Recuperado de Flow of fluids through valves, fitting and pipe, technical paper 410 (2011) Crane Co.

c. Determinación del ahorro:

Tabla 47

Determinación de ahorro y consumo de cada escenario

Determinación del ahorro

Constantes utilizadas

Horas de operación	6600	h/año
PCS búnker	18300	BTU/lbm
Eficiencia caldera	84%	
Densidad búnker	2.0944	lbm/litro

Consumo energético en cada escenario

	Sin aisl.	Con aisl.	Ahorro	
Energía	194,463	16,463	178,000	MBTU/año
Búnker	6,040	511	5,529	litros/año

Nota. Elaboración propia

d. Aislamiento de tuberías de vapor del calefactor de calderas

Ilustración 22

Temperatura de conductividad

MEAN TEMP		Thermal Conductivity, k	
°F	°C	BTU in/h ft ² °F	W/m ² °C
0	-18	0.183	0.026
100	38	0.237	0.034
200	93	0.295	0.043
300	149	0.360	0.052
400	204	0.437	0.063
500	260	0.528	0.076
600	316	0.638	0.092
700	371	0.771	0.111
800	427	0.929	0.134

Nota. fuente: Flow of fluids through valves, fitting and pipe, technical paper 410 (2011) Crane Co.

Tabla 48

Determinación de ahorro y consumo de cada escenario

Determinación del ahorro

Constantes utilizadas

Horas de operación	6600	h/año
PCS búnker	18300	BTU/lbm
Eficiencia caldera	84%	
Densidad búnker	2.0944	lbm/litro

Consumo energético en cada escenario

	Sin aisl.	Con aisl.	Ahorro	
Energía	91,434	13,093	78,341	MBTU/año
Búnker	2,840	407	2,433	litros/año

Nota. Elaboración propia

- e. Control de bombas

Ilustración 23

Características de las bombas



Información del motor		
Marca	Baldor	
Modelo	B4F06-883	
Potencia	0.75	HP

Nota. Elaboración propia

Tabla 49*Representación esquema de funcionamiento*

Esquema de operación propuesto para la bomba de búnker			Horas anuales de operación de la caldera	
Tiempo encendida	5	minutos	Caldera	Horas/año
Tiempo apagada	10	minutos	250	0

Nota. Elaboración propia

f. Mejora de eficiencia de combustión de caldera de 600 BHP

Tabla 50*Medición de gases de la carga y condiciones de operación***MEDICIÓN DE GASES DE LA CALDERA**

Carga [%]	T _{GASES} [°C]	O ₂ [%]	CO [ppm]	CO ₂ [%]
30%	184	9.5	0	8.7
50%	195	5.9	0	11.5
75%	210.8	7.3	0	10.4
100%	216.9	6.9	3	10.7

CONDICIONES DE OPERACIÓN

Parámetro	Unidades	Actual	Esperada
% O ₂		7.4	4
% CO		0	0
% CO ₂		10	10
T _{CHIMENEA}	°F	395	386
Presión	psig	125	125

Nota. Elaboración propia

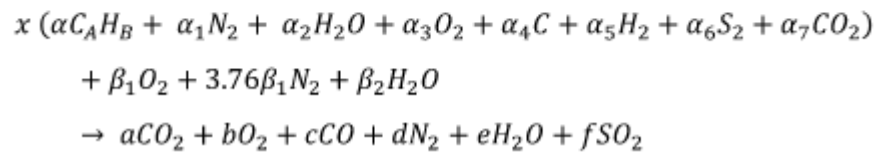
Tabla 51*Condiciones Ambientales***CONDICIONES AMBIENTALES**

T_{AMB}	25	°C
P_{AIRE}	0.072	lbm/ft ³
Cp_{AIRE}	0.24	BTU/lb
% HR	60%	
$W_2 H_{especifica}$	0.018	
WA Peso _{AIRE}	28.853	
W_{H2O}	18.0159	

Nota. Elaboración propia

Tabla 52*Propiedades del bunker***PROPIEDADES DEL BÚNKER**

Densidad	59.31	lb/ft ³
PCS	18300	BTU/lbm
$P_{molecular}$	1.410614	lbm/mol

REACCIÓN QUÍMICA DE LA COMBUSTIÓN

Nota.Fuente Recope (2021)

Tabla 53*Composición química del búnker*

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BÚNKER				
Elemento	Peso mol		Factor	
C	12	A	31.3600	376.66
H	1	B	42.6500	42.99
N ₂	28	α_1	0.1108	3.10
H ₂ O	18	α_2	0	0
O ₂	32	α_3	0.0296	0.95
C	12	α_4	0	0
H ₂	2	α_5	0	0
S ₂	64	α_6	0.0739	4.74
CO ₂	44	α_7	0	0
Subtotal			428.44	
α			0.785	
x			0.004194	

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AIRE				
Elemento	Peso mol	Factor	Actual	Esperada
O ₂	32	β_1	0.212851	0.178851
N ₂	28	3.76 β_1	0.80032	0.67248
H ₂ O	18	β_2	0.029207	0.024542

PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN				
Elemento	Peso mol	Factor	Actual	Esperada
CO ₂	44	a	0.10325	0.10325
O ₂	32	b	0.074	0.04
CO	28	c	0	0
N ₂	28	d	0.800785	0.672945
H ₂ O	18	e	0.099418	0.094752
SO ₂	64	f	0.00062	0.00062

Nota. Elaboración propia

Ecuaciones

1. Fracción molar del combustible

$$x = \frac{a + c}{\alpha A + \alpha_4 + \alpha_7}$$

x	0.004194
---	----------

2. Sulfuro

$$f = 2x\alpha_6$$

f	0.00062
---	---------

3. Oxígeno

$$x\left(\frac{\alpha_2}{2} + \alpha_3 + \alpha_7\right) + \beta_1 + \frac{\beta_2}{2} = a + \frac{c}{2} + b + f + \frac{e}{2}$$

$$\rightarrow \beta_1 + \frac{\beta_2}{2} - \frac{e}{2} = a + \frac{c}{2} + b + f - x\left(\frac{\alpha_2}{2} + \alpha_3 + \alpha_7\right) = K1$$

K1 _{ACTUAL}	0.177746
K1 _{PROPUESTA}	0.143746

4. Hidrógeno

$$e = x\left(\alpha\frac{B}{2} + \alpha_2 + \alpha_5\right) + \beta_2 = K2 + \beta_2$$

K2	0.070211
----	----------

5. Vapor de agua

$$\beta_2 = W_2(W_A/W_{H2O}) * 4.76\beta_1 = K3\beta_1$$

K3	0.137219
----	----------

6. Resolviendo ecuaciones de 3., 4. y 5.

$$\beta_2/K3 + \beta_2/2 - (K2 + \beta_2)/2 = K1$$

$$\rightarrow \beta_2/K3 - K2/2 = K1$$

$$\rightarrow \beta_2 = (K1 + K2/2)K3$$

	Actual	Esperada
β_2	0.029207	0.024542
e	0.099418	0.094752
β_1	0.212851	0.178851

7. Nitrógeno

$$d = x\alpha_1 + 3.76\beta_1$$

d_{ACTUAL}	0.800785
$d_{PROPUESTA}$	0.672945

PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN (normalizado)

Elemento	Peso mol	Actual	Esperada
CO ₂	44	0.095773	0.095773
O ₂	32	0.068641	0.037103
CO	28	0	0
N ₂	28	0.742793	0.624211
H ₂ O	18	0.092218	0.087891
SO ₂	64	0.000575	0.000575

CÁLCULO DE LA EFICIENCIA POR MÉTODO INDIRECTO

PÉRDIDAS POR BASE SECA

Ecuaciones

$$mol_{DG} = mol_{CO_2} + mol_{O_2} + mol_{CO} + mol_{N_2} + mol_{SO_2} \text{ [moles]}$$

$$M_{\#\#} = mol_{\#\#}/mol_{FUEL} * m_{\#\#}/mol_{\#\#} * mol_{FUEL}/m_{FUEL} \text{ [lb}_{\#\#}/\text{lb}_{FUEL}]$$

$$EA_{Vr} = mol_{DG} * \left(\frac{\%O_2}{21\% - \%O_2} \right) \text{ [ft}^3_{AIRE}/\text{ft}^3_{FUEL}]$$

$$EA_{Mr} = EA_{Vr} * \rho_{AIRE} * 1/\rho_{FUEL} \text{ [lb}_{AIRE}/\text{lb}_{FUEL}]$$

$$DG = EA_{Mr} + M_{CO_2} + M_{O_2} + M_{CO} + M_{N_2} + M_{SO_2} \text{ [lb}_{gases\ secos}/\text{lb}_{FUEL}]$$

$$E_{SENSIBLE} = DG * C_{p_{AIRE}} * (T_{CHIMENEA} - T_{AMBIENTE}) \text{ [BTU/lb]}$$

$$L_{DG} = E_{SENSIBLE}/PCS$$

	Actual	Esperada	
m_{DG}	0.9078	0.7577	[moles]
M_{CO_2}	2.9881	2.9881	[lb _{CO2} /lb _{FUEL}]
M_{O_2}	1.5571	0.8417	[lb _{O2} /lb _{FUEL}]
M_{CO}	0	0	[lb _{CO} /lb _{FUEL}]
M_{N_2}	14.7525	12.3974	[lb _{N2} /lb _{FUEL}]
M_{SO_2}	0.0261	0.0261	[lb _{SO2} /lb _{FUEL}]
EA_{Vr}	0.4939	0.1783	[ft ³ _{AIRE} /ft ³ _{FUEL}]
EA_{Mr}	0.0006	0.0002	[lb _{AIRE} /lb _{FUEL}]
DG	19.3244	16.2535	[lb _{gases secos} /lb _{FUEL}]
$E_{SENSIBLE}$	1,474.91	1,205.42	[BTU/lb]
L_{DG}	8.06%	6.59%	

PÉRDIDAS POR BASE HÚMEDA

Ecuaciones

$$M_{H_2O} = mol_{H_2O}/mol_{FUEL} * m_{H_2O}/mol_{H_2O} * mol_{FUEL}/m_{FUEL} \text{ [lb}_{H_2O}/\text{lb}_{FUEL}]$$

$$h_{VAPOR} = 1055 + (0.467 * T_{CHIMENEA}) \text{ [BTU/lb]}$$

$$\Delta h = h_{VAPOR} - h_{LIQUIDO} \text{ [BTU/lb]}$$

$$E_{H_2O} = M_{H_2O} * \Delta h \text{ [BTU/lb]}$$

$$L_{WG} = E_{H_2O}/PCS$$

	Actual	Esperada	
M_{H_2O}	1.1778	1.1225	[lb _{H2O} /lb _{FUEL}]
$h_{LIQUIDO}$	162.0980	162.0980	[BTU/lb]
h_{VAPOR}	1,239.47	1,235.27	[BTU/lb]
Δh	1,077.37	1,073.17	[BTU/lb]
E_{H_2O}	1,268.91	1,204.64	[BTU/lb]
L_{WG}	6.93%	6.58%	

COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS Y AHORRO POTENCIAL

η_{ACTUAL}	85.01%
$\eta_{ESPERADA}$	86.83%
Mejora η	2.15%

PARTICIPACIÓN DE CADA CALDERA EN EL CONSUMO

C. 600 BHP	75.0%
C. 350 BHP	25.0%

ESTIMACIÓN DEL AHORRO

Consumo actual	2,146,686 litros/año
Consumo esperado	2,100,629 litros/año
Ahorro potencial	46,057 litros/año

Nota. Elaboración propia

2. Cotizaciones de trampas de vapor

Cotización e información Trampas TV3 y TV4:

- Función: Trampeo previo ERP de pulverización caldera 600 BHP
- Modelo: TD52
- Tipo: Termodinámica
- Código Fabricante: SAR
- Fabricante: Spirax Sarco
- Presión de trabajo (psig): 130
- Diámetro de Conexión: 1 In
- Orificio (MOP)(psig): 600
- Conexión: NPT



Haz clic en la imagen para obtener una vista ampliada

TD52 1/2\" 54530C Trampa de vapor termodinámica, 1/2 pulgada NPT(F), 600 psi
Marca: SPIRAX SARCO
[Buscar en esta página](#)

US\$309⁰⁰

Material	Acero aleado
Marca	SPIRAX SARCO
Color	Latón
Tipo de conector	Trampa
Acabado exterior	Latón
Tipo de rosca	NPT
Número de piezas	1

[Ver más](#)

Sobre este artículo

- Equipos e instrumentos de laboratorio
- Dimensiones del paquete: 2.52 H x 3.14 L x 2.51 W (pulgadas)
- Peso del paquete: 1.1 libras
- País de origen: Estados Unidos

[Informar de un problema con este producto o vendedor](#)

US\$309⁰⁰

Entrega GRATIS entre el 9 - 11 de abril. [Ver detalles](#)

O entrega más rápida el martes, 8 de abril. [Ver detalles](#)

Entrega en Miami 33197 - [Actualizar ubicación](#)

Disponible

Cantidad: 1

[Agregar al Carrito](#)

[Comprar ahora](#)

Enviado por [ADM Industrial supply](#)

Vendido por [ADM Industrial supply](#)

Devoluciones [Reintegro o reemplazo en 30 días](#)

Pago [Transacción segura](#)

Precio venta \$309, se implementa un 30% para la exportación del producto a Costa Rica teniendo un precio total de \$401.70.

Nota. Elaboración propia

Cotización e información trampa TV17

- Función: Votator 4
- Modelo: 125A8
- Tipo: Flotador y termostática
- Código Fabricante: ARM
- Fabricante: Armstrong
- Presión de trabajo (psig): 80
- Diámetro de Conexión: 2 In
- Orificio (MOP)(psig): 125
- Conexión: NPT



Armstrong Model 125-A8 - A Series 2" 125 psi Cast Iron F&T Trap

SKU: AN1212 MODEL: 125A8 MPN: D500146

List Price: \$1,779.00

\$1,472.28 / each

Save \$306.72 (17%)

ADD TO CART

ADD TO QUOTE

- 1 +

Ships within 2 weeks

Repair Parts
[View All](#)

Precio venta \$ 1472,78, se implementa un 30% para la exportación del producto a Costa Rica teniendo un precio total de \$1914.61.

Info técnica

Specifications	
Brand	Armstrong International
MPN	D500146
Model	125A8
Series	A Series
Steam Trap Type	Float & Thermostatic
Body Material	Cast Iron
Steam Trap Connection Size	2"
Steam Trap Mounting	Same Side
Max Pressure	125 psi
Alias	125-A8
Weight	40.00

Nota. Elaboración propia

Cotización e información trampa TV19 y TV40

- Función: Votator 6
- Modelo: FT-125
- Tipo: Flotador y termostática
- Código Fabricante: SAR
- Fabricante: Spirax Sarco
- Presión de trabajo (psig): 80
- Diámetro de Conexión: 1 1/2In
- Orificio (MOP)(psig): 125
- Conexión: NPT



Spirax Sarco 57062, FT125 Float and Thermostatic Steam Trap, 1-1/2 in, FNPT, 450 deg F, 125 psi, Cast Iron

CBPN: 7521 MPN: 57062

\$948.22 / EA

In Stock: 4 [See Locations](#)

QTY

[Add to Cart](#)

[ADD TO LIST](#)

[+/- CUSTOMER PART NUMBER](#)



DESCRIPTION

Spirax Sarco Float and Thermostatic Steam Trap, 1-1/2 in Nominal, FNPT, 8-1/2 in Length, 125 psi, Cast Iron, 450 deg F, 8.4 in H

The trap contains a float valve mechanism which modulates to discharge condensate continuously at steam temperature, while non-condensable gases are released by a separate internal balanced pressure thermostatic air vent.

Spirax Sarco FT-125 Steam Traps are convenient to maintain as they can be serviced without disrupting piping connections. Nonetheless, prior to any maintenance, it's crucial to fully isolate the trap from both the supply and return lines. Periodic disassembly of the trap is necessary for thorough inspection and cleaning of its valve head, seat, operating mechanism, and air vent. Any worn or damaged components should be replaced using an air vent assembly or complete valve mechanism assembly. The Spirax FT-125 spare parts include a Float Kit, set of 3 Gaskets, Valve Mechanism Assembly, and Air Vent Assembly.

Precio venta \$ 948,22, se implementa un 30% para la exportación del producto a Costa Rica teniendo un precio total de \$1232.68

Info técnica:

SPECIFICATIONS

Brand: Spirax Sarco

Weight: 18 lbs

Nominal Size: 1-1/2 in

End Style: FNPT

Max Operating Pressure: 125 psig

Max Allowable Pressure: 125 psig/up to 450 deg F

Max Allowable Temperature: 450 deg F/up to 125 psig

Material: Cast Iron

Dimensions: 8.4 in H

Length: 8-1/2 in

Manufacturer Name: Spirax-Sarco Inc

Series: FT125

Application: All process equipment, particularly when controlled by modulating temperature control valves, also for unit heaters, air heating coils, heat exchangers and steam main drip stations

Standards and Approvals: ASTM A126 Class B Body

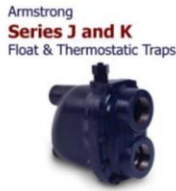
ITEM FEATURES

- 450 deg F Maximum operating temperature
- 125 psig at 450 deg F Maximum allowable pressure
- 450 deg F at 0 to 120 psig Maximum allowable temperature
- Parallel piping configuration
- Stainless steel Internals

Nota. Elaboración propia

Cotización e información trampa TV20

- Función: Intercambiador de calor tubular
- Modelo: 125JD8
- Tipo: Flotador y termostática
- Código Fabricante: ARM
- Fabricante: Spirax Sarco
- Presión de trabajo (psig): 80
- Diámetro de Conexión: 2 In
- Orificio (MOP)(psig): 125
- Conexión: NPT



Armstrong Model 125-JD8 - J Series 2" 125 psi Cast Iron F&T Trap

SKU: AN1275 MODEL: 125-J8 MPN: C6124

List Price: \$2,729.00
\$2,183.20 / each
 Save \$545.80 (20%)

[ADD TO CART](#)
[ADD TO QUOTE](#)

Ships within 2 weeks Repair Parts [View All](#)

Precio venta \$ 2183,20, se implementa un 30% para la exportación del producto a Costa Rica teniendo un precio total de \$2838.16

Info técnica:

Specifications ☰	
Brand	Armstrong International
MPN	C6124
Model	125-J8
Series	JD Series
Steam Trap Type	Float & Thermostatic
Body Material	Cast Iron
Steam Trap Connection Size	2"
Steam Trap Mounting	Same Side
Max Pressure	125 psi
Weight	80.00

Nota. Elaboración propia

Cotización e información trampa TV22, TV23, TV25, TV36:

- Función: 'Trampeo previo ERP llenadora 1,3, Trampeo previo ERP CIP de banano y Pierna colectora sobre paso 6 evaporador 1.
- Modelo: 125JD8
- Tipo: Balde Invertido
- Código Fabricante: ARM
- Fabricante: Armstrong
- Presión de trabajo (psig): 130
- Diámetro de Conexión: 3/4 In
- Orificio (MOP)(psig): 125
- Conexión: NPT



**Armstrong 800 Inverted Bucket Trap 3/4" NPT 20 PSI
3/16" Orifice C5297-6**

SKU: AN1071 MODEL: 800 MPN: C5297-6

List-Price: \$232.00

\$222.72 / each

Save \$9.28 (4%)

ADD TO CART

ADD TO QUOTE

- 1 +

13 in stock
Ships Monday

Repair Parts
[View All](#)

Precio venta \$ 222.72 se implementa un 30% para la exportación del producto a Costa Rica teniendo un precio total de \$289.54.

Nota. Elaboración propia

3. Cálculos de rentabilidad:

Tabla 54

Resultados totales de ahorro en litros de bunker en 8 meses

Proyecto	litros / año
Aseptico	5528,8
calderas	2 433,30
Corrección combustión de calderas	46057,4
Trampas de vapor	209478,26
retorno de condensado	7725,48
Total	271223,24

Nota. Elaboración propia

Análisis comparativo de bunker consumido, perdidas y el ahorro en caso de implementar las propuestas de mejora

Tabla 55

Análisis comparativo de bunker consumido respecto a la producción

Proyecto	Estimación de CO ₂ evitado por proyecto (usando 2.68 kg CO ₂ por litro)		Costo dolares			Costo en colones	
	Ahorro (litros)	Estimación CO ₂ evitado (kg)	Ahorro US\$	Implementación	Ahorro colones	Implementación	
1. Aislamiento Tuberías Aséptico/Clarificado	3686	9874 kg	\$ 1 555	\$ 320	\$ 777 500	\$ 160 050	
2. Aislamiento Calefactores + Automatización Búnker	1622	4348 kg	\$ 684	\$ 1 000	\$ 341 995	\$ 500 015	
3. Eficiencia Combustión	30705	142824 kg	\$ 19 426	\$ 2 200	\$ 9 712 850	\$ 1 100 000	
4. Recuperación Vapor Flash	515	27826 kg	\$ 40 084	\$ 40 218	\$ 20 042 000	\$ 20 109 025	
5. Trampas de Vapor	165675	444009 kg	\$ 86 369	\$ 11 866	\$ 43 184 500	\$ 5 933 000	
Total	202203	628881	\$ 148 118	\$ 55 604	\$ 74 058 845	\$ 27 802 090	

Nota. Elaboración propia

Ilustración 24

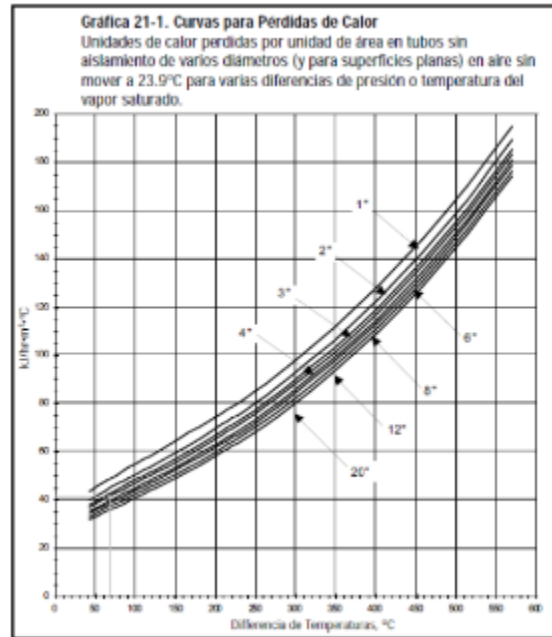
Conductividad térmica para materiales comunes

Material	W/m.K
Acero	47-58
Agua	0,58
Aire	0,02
Alcohol	0,16
Alpaca	29,1
Aluminio	209,3
Amianto	0,04
Bronce	116-186
Cinc	106-140
Cobre	372,1-385,2
Corcho	0,04-0,30
Estaño	64,0
Fibra de Vidrio	0,03-0,07
Glicerina	0,29
Hierro	1,7
Ladrillo	0,80
Ladrillo Refractario	0,47-1,05
Latón	81-116
Litio	301,2
Madera	0,13
Mercurio	83,7
Mica	0,35
Níquel	52,3
Oro	308,2
Parafina	0,21
Plata	406,1-418,7
Plomo	35,0
Vidrio	0,6-1,0

Nota. Fuente: Netto (2014)

Ilustración 25

Factor transferencia de Calor



Nota. Fuente: Armstrong Internacional, Inc (1998)

Ilustración 26

Propiedades de tubería comercial

Diámetro Nominal (pulg.)	Diámetro Exterior		Diámetro Interior		Espesor de Pared		Presión a 23 °C		Peso Aprox. kg/m
	(pulg.) (O.D.)	(mm)	(pulg.) (I.D.)	(mm)	(pulg.) (T)	(mm)	(psi)	(kg/cm ²)	
1/2"	0.840	21.3	0.528	13.4	0.147	3.7	850	59.5	0.30
3/4"	1.050	26.7	0.724	18.4	0.154	3.9	690	48.3	0.41
1"	1.315	33.4	0.936	23.8	0.179	4.5	630	44.1	0.60
1 1/4"	1.660	42.2	1.255	31.9	0.191	4.9	520	36.4	0.82
1 1/2"	1.900	48.3	1.476	37.5	0.200	5.1	470	32.9	1.00
2"	2.375	60.3	1.913	48.6	0.218	5.5	400	28.0	1.39
2 1/2"	2.875	73.0	2.290	58.2	0.276	7.0	420	29.4	2.11
3"	3.500	88.9	2.864	72.7	0.300	7.6	370	25.9	2.83
4"	4.500	114.3	3.786	96.2	0.337	8.6	320	22.4	4.14
6"	6.625	168.3	5.709	145.0	0.432	11.0	280	19.6	7.90
8"	8.625	219.1	7.565	192.2	0.500	12.7	250	17.5	11.98
10"	10.750	273.1	9.493	241.1	0.593	15.1	230	16.1	17.78
12"	12.750	323.9	11.294	286.9	0.687	17.4	230	16.1	24.45
14"	14.000	355.6	12.413	406.8	0.752	14.3	220	15.4	29.43
16"	16.000	406.4	14.214	361.0	0.843	21.4	220	15.4	37.82
18"	18.000	457.2	16.014	406.8	0.937	23.8	220	15.4	47.34
20"	20.000	508.0	17.814	452.5	1.031	26.2	220	15.4	59.62
24"	24.000	609.6	21.418	544.0	1.218	30.9	210	14.7	84.60

Nota. Fuente: Comercial (2021)

Ilustración 27

Precio Combustible

Terminales de Venta (Litros)

Precios en colones a clientes directos en nuestras terminales de venta:

PRODUCTO	PRECIO ¢/LITRO SIN IMPUESTO	IMPUESTO ÚNICO	PRECIO ¢/LITRO TOTAL
BUNKER TERMICO ICE	297.1700	25.5000	322.6700
DIESEL 50	342.7400	155.5000	498.2400
AV GAS (100 LL)	599.6900	262.7500	862.4400
BUNKER TERMICO ICE 2	237.0000	25.5000	262.5000
KEROSENE	354.9500	75.0000	429.9500
GASOLINA PLUS 91 (REGULAR)	307.8400	262.7500	570.5900
GASOLINA SUPER (SUPERIOR)	327.1100	275.0000	602.1100
GASOLEO	312.0200	51.5000	363.5200
BUNKER C	267.7400	25.5000	293.2400
JET A-1	358.5900	157.5000	516.0900

Nota. Fuente: Recope (2021)

Ilustración 28

Poder Calórico de los combustibles

Poder calórico

El calor de combustión es la cantidad de energía que produce un material (líquido, sólido o gas) al quemarse completamente. Se expresa en unidades de energía (MJ) por unidades de masa (kg) y varía dependiendo del tipo de combustible.

Producto	Poder calórico
Búnker	42,46 MJ/kg (41,90 MJ/L)
Diésel 50	45,57 MJ/kg (37,64 MJ/L)
Gas Licuado de Petróleo (LPG)	48.00 MJ/kg (25,68 MJ/L)
Gasóleo	43.08 MJ/kg (38,99 MJ/L)
Gasolinas	45.50 MJ/kg (33,49 MJ/L)
Keroseno y Jet A-1	45,83 MJ/kg (36,62 MJ/L)

Valores determinados el 28.06.2017

*Estos valores de calor de combustión no son absolutos, y pueden variar en un mismo producto dependiendo de la composición química de cada uno ellos.

última actualización: 16/04/2021

Nota. Fuente: Recope (2021)

Anexo III

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA USO Y MANEJO DE LOS
TRABAJOS

FINALES

DE GRADUACIÓN UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL Página | 37
(Trabajo Individual)

Ciudad,

Fecha.

Señores/as

Vicerrectoría de Investigación. Sistema Integrado de Bibliotecas y Recursos
Digitales

Estimados señores/as:

Yo María Fernanda Prado Hidalgo portador (a) de la cédula de identidad número
117880444 En mi calidad de autor (a) del trabajo de graduación titulada:

“Análisis energético del sistema para generación y distribución de vapor saturado

en una empresa productora de materia prima en el área de alimentos durante el

primer semestre del 2025”

El cual se presenta bajo la modalidad de, marque una opción:

Proyecto de Graduación

Tesis de Graduación

Presentado en la fecha 30 de julio del 2025, autorizo a la Universidad Técnica
Nacional, sede central para que mi trabajo pueda ser manejado de la siguiente
manera:

Autorizo Ver capítulo V, disposiciones finales, artículo 41 (O aquel que refiera a derechos patrimoniales)	
Marque con una X o un v/	
Conservación de ejemplares para préstamo y consulta física en biblioteca.	X
Inclusión en el catálogo digital del SIBIREDI (Cita catalográfica)	X
Comunicación y divulgación a través del Repositorio Institucional	X
Resumen (Describe en forma breve el contenido del documento)	X
Consulta electrónica con texto protegido	X
Descarga electrónica del documento en texto completo protegido	X
Inclusión en bases de datos y sitios web que se encuentren en convenio con la Universidad Técnica Nacional contando con las mismas condiciones y limitaciones aquí establecidas.	X
Divulgación del resumen en el Repositorio UTN, con una cantidad de 200 a 500 palabras	X

Por otra parte, declaro que el trabajo que aquí presento es de plena autoría, es un esfuerzo realizado de forma personal, académica e intelectual con plenos elementos de originalidad y creatividad. Garantizo que no contiene citas, ni transcripciones de forma indebida que puedan devenir en plagio, pues se ha utilizado la normativa vigente de la American Psychological Association (APA). Las citas y transcripciones utilizadas se realizan en el marco de respeto a las obras de terceros. La responsabilidad directa en el diseño y presentación son de competencia exclusiva, por tanto, eximo de toda responsabilidad a la Universidad Técnica Nacional.

Consciente de que las autorizaciones no reprimen mis derechos patrimoniales como autor del trabajo. Confío en la que Universidad Técnica Nacional respete y haga respetar mis derechos de propiedad intelectual.

Firma del estudiante: _____



Cédula:

117880444

Día: 04 de agosto 2025

(Reformado mediante Acuerdo 9-3-2021, tomado por el Consejo Universitario en la Sesión Ordinaria No. 3-2021, celebrada el jueves 11 de febrero de 2021, a las nueve horas, según el Artículo 12. Publicado en el diario oficial La Gaceta No. 39 del 25 de febrero del 2021, sección de Reglamentos).