

UNIVERSIDAD HISPANOAMERICANA

CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN DE MEJORA
EN EL PROCESO DE MANTENIMIENTO PARA EL
SISTEMA DE RECICLAJE DE ACEITE USADO
(UORS) DE LA EMPRESA METALUB PLANTA
OROTINA EN EL TERCER CUATRIMESTRE 2024

PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR
POR LA LICENCIATURA EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL.

ESTUDIANTE:

KELVIN RAÚL OBANDO ORTIZ

TUTOR:

MARCO CARTÍN GAMBOA

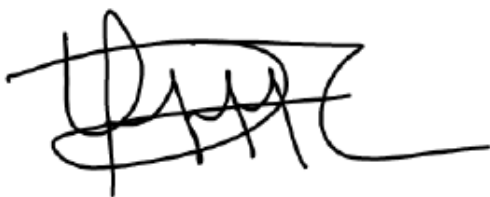
PUNTARENAS, 2025

ACTA DE APROBACIÓN

DECLARACIÓN JURADA

Yo, Kelvin Raúl Obando Ortiz, mayor de edad, portador de la cédula de identidad número 6-0329-0593, egresado de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Industrial de la Universidad Hispanoamericana, hago constar por medio de éste acto y debidamente apercibido y entendido de las penas y consecuencias con las que se castiga en el Código Penal el delito de perjurio, ante quienes se constituyen en el Tribunal Examinador de mi trabajo de tesis para optar por el título de Licenciatura en Ingeniería Industrial, juro solemnemente que mi trabajo de investigación titulado: “Propuesta e implementación de mejora en el proceso de mantenimiento para el sistema de reciclaje de aceite usado (UORS) de la empresa Metalub Planta Orotina en el tercer cuatrimestre de 2024”, es una obra original que ha respetado todo lo preceptuado por las Leyes Penales, así como la Ley de Derecho de Autor y Derecho Conexos número 6683 del 14 de octubre de 1982 y sus reformas, publicada en la Gaceta número 226 del 25 de noviembre de 1982; incluyendo el numeral 70 de dicha ley que advierte; artículo 70. Es permitido citar a un autor, transcribiendo los pasajes pertinentes siempre que éstos no sean tantos y seguidos, que puedan considerarse como una producción simulada y sustancial, que redunde en perjuicio del autor de la obra original. Asimismo, quedo advertido que la Universidad se reserva el derecho de protocolizar este documento ante Notario Público.

En fe de lo anterior, firmo en la ciudad de Puntarenas, a los trece días del mes de febrero del año dos mil veinticinco.



Firma del estudiante

Cédula: 6-0329-0593

CARTA DEL TUTOR

Heredia, 13 de Febrero de 2025

Destinatario
Departamento de Registro
Universidad Hispanoamericana

Estimados señores:

El estudiante Kelvin Raúl Obando Ortiz, me ha presentado, para efectos de revisión y aprobación, el trabajo de investigación denominado: PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN DE MEJORA EN EL PROCESO DE MANTENIMIENTO PARA EL SISTEMA DE RECICLAJE DE ACEITE USADO (UORS) DE LA EMPRESA METALUB PLANTA OROTINA EN EL TERCER CUATRIMESTRE 2024, el cual ha elaborado para optar por el grado académico de Licenciatura.

En mi calidad de tutor, he verificado que se han hecho las correcciones indicadas durante el proceso de tutoría y he evaluado los aspectos relativos a la elaboración del problema, objetivos, justificación; antecedentes, marco teórico, marco metodológico, tabulación, análisis de datos; conclusiones y recomendaciones.

De los resultados obtenidos por el postulante, se obtiene la siguiente calificación:

a)	ORIGINAL DEL TEMA	10%	10%
b)	CUMPLIMIENTO DE ENTREGA DE AVANCES	20%	10%
c)	COHERENCIA ENTRE LOS OBJETIVOS, LOS INSTRUMENTOS APLICADOS Y LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACION	30%	23%
d)	RELEVANCIA DE LAS CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	20%	20%
e)	CALIDAD, DETALLE DEL MARCO TEORICO	20%	20%
	TOTAL		83%

En virtud de la calificación obtenida, se avala el traslado al proceso de lectura.

Atentamente,

MARCO CARTIN
 GAMBOA
 (FIRMA)

Firmado digitalmente
 por MARCO CARTIN
 GAMBOA (FIRMA)
 Fecha: 2025.02.13
 15:05:26 -06'00'

Ing. Marco Cartín Gamboa. MII
Cédula identidad: 110610393
Carné Colegio Profesional: II-15546

CARTA DEL LECTOR

Puntarenas, 16 de abril de 2025

Señores:
Carrera Ingeniería Industrial
Universidad Hispanoamericana

Estimado señor:

El estudiante Kelvin Obando Ortíz, cédula de identidad número 603290593, me ha presentado, para efectos de revisión y aprobación, el trabajo de investigación denominado "**Propuesta e implementación de mejora en el proceso de mantenimiento para el sistema de reciclaje de aceite usado (uors) de la empresa Metalub planta Orotina en el tercer cuatrimestre**", el cual ha elaborado para optar por el grado académico de Licenciatura.

En mi calidad de Lector, he verificado que se han hecho las correcciones indicadas durante el proceso de lectura, por lo que se avala el traslado al siguiente paso.

Atentamente,



Nombre Jonathan Pérez Largaespada
Cédula identidad: 205820315
Carné Colegio Profesional: NA 2871

**UNIVERSIDAD HISPANOAMERICANA
CENTRO DE INFORMACION TECNOLOGICO (CENIT)
CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA
REPRODUCCION PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA
DE LOS TRABAJOS FINALES DE GRADUACION**

Puntarenas, 29 de mayo de 2025

Señores:
Universidad Hispanoamericana
Centro de Información Tecnológico (CENIT)

Estimados Señores:

El suscrito Kelvin Raúl Obando Ortiz con número de identificación 603290593 autor del trabajo de graduación titulado PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN DE MEJORA EN EL PROCESO DE MANTENIMIENTO PARA EL SISTEMA DE RECICLAJE DE ACEITE USADO (UORS) DE LA EMPRESA METALUB PLANTA OROTINA EN EL TERCER CUATRIMESTRE 2024 presentado y aprobado en el año 2025 como requisito para optar por el título de Licenciatura en Ingeniería Industrial; Si autorizo al Centro de Información Tecnológico (CENIT) para que con fines académicos, muestre a la comunidad universitaria la producción intelectual contenida en este documento.

De conformidad con lo establecido en la Ley sobre Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica.

Cordialmente,

 603290593
Firma y Documento de Identidad

DEDICATORIA

A mi familia, quienes han sido mi pilar fundamental a lo largo de este camino. Su apoyo incondicional, sus consejos y su amor han sido la fuerza que me ha impulsado a superar cada obstáculo. A mis padres, por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia; a mis hermanos, por estar siempre a mi lado brindándome su confianza y motivación. Sin ustedes, este logro no habría sido posible. Con todo mi corazón, les dedico este trabajo como un reflejo de la dedicación y los valores que me han inculcado.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido en este proceso de formación y culminación de mi proyecto de graduación.

A mi pareja sentimental, Mariela, por su amor, paciencia y constante apoyo en cada etapa de este camino. Su comprensión y aliento han sido fundamentales para superar los momentos de mayor desafío.

A mi tutor, Marco Cartín Gamboa, por su orientación, consejos y compromiso con mi formación académica. Su guía ha sido clave para el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros de trabajo y amigos, quienes con su amistad y colaboración hicieron de este trayecto una experiencia enriquecedora y memorable.

A la Universidad Hispanoamericana y a todos mis profesores, por compartir sus conocimientos y contribuir a mi crecimiento profesional.

Finalmente, a todos aquellos que, de una u otra forma, han dejado una huella en mi formación y han sido parte de este importante logro. ¡Gracias infinitas!

TABLA DE CONTENIDO

Acta de aprobación.....	2
Dedicatoria.....	6
Agradecimientos.....	7
Índice de figuras.....	12
Índice de tablas.....	13
Acrónimos y Siglas.....	13
Resumen.....	16
Capítulo I: Planeamiento del proyecto.....	17
1.1 Descripción general del proyecto.....	18
1.2 Identificación de la organización donde se realiza el proyecto.....	18
1.2.1 Descripción general de la organización.....	18
1.2.2 Antecedentes de la organización.....	25
1.3 Planteamiento del problema.....	28
1.3.1 Definición y medición del problema.....	28
1.3.2 Justificación del proyecto.....	31
1.4 Objetivos del proyecto.....	32
1.4.1 Objetivo general.....	32
1.4.2 Objetivos específicos.....	32
1.5 Alcances y limitaciones.....	32
1.5.1 Alcances.....	32

Capítulo II: Marco Teórico.....	33
2.1 Marco conceptual general relativo a la carrera	34
2.1.1 Impacto de la ingeniería en la industria petrolera.....	34
2.1.2 Procesos de separación del petróleo	35
2.1.3 Diferentes usos de los derivados del petróleo.....	36
2.1.4 Características y usos de los aceites base	38
2.1.5 Disposición final de los residuos de productos derivados del petróleo.....	39
2.1.6 Procesos de re-refinación de aceites usados.....	39
2.1.7 Mantenimiento industrial	40
2.1.8 Importancia del mantenimiento industrial en una operación	41
2.2 Marco conceptual atinente a la gestión del proyecto	41
2.2.1 Definir.....	42
2.2.2 Medir	43
2.2.3 Analizar	45
2.2.4 Mejorar.....	46
2.2.5 Controlar	46
2.3 Marco conceptual referente al impacto del proyecto	48
2.3.1 Productividad	48
2.3.2 Evaluación de viabilidad económica.....	49
2.4 Antecedentes de proyectos o experiencias semejantes	51
Capítulo III: Metodología de trabajo	56
3.1 Metodología para la definición del problema	57

	10
3.2 Metodología para la medición y respaldo cualitativo deL proyecto	59
3.2.1 Metodología para la medición.....	59
3.2.2 Metodología para el análisis	61
3.3 Metodología para la propuesta de mejora, construcción o puesta en práctica de un nuevo proceso, producto o servicio.....	61
3.4 Metodología para la implementación del proyecto.....	63
3.5 Metodología para la verificación, aseguramiento, control y seguimiento de resultados	65
Capítulo IV. Análisis de causas ra íz	66
4.1 descripción detallada del proceso	67
4.2 Análisis de los datos recolectados	69
4.3 Diagrama de causa-efecto ISHIKAWA.....	74
4.4 Aplicación del método de los 5 Porqués	77
4.5 Resultados del análisis.....	81
Capítulo V: Diseño e implementación de la solución	83
5.1 Descripción de las propuestas	84
5.2 Propuesta de construcción de Bypass	84
5.3 Viabilidad económica de las propuestas	86
5.4 Implementación de las propuestas.....	90
5.4.1 Construcción del bypass	90
5.4.2 Etapa de pruebas	94
5.4.3 Etapa de elaboración de instructivo y de capacitación	95

	11
5.4.4 Etapa de seguimiento y control de la implementación.....	97
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones.....	98
6.1 Conclusiones	99
6.2 Recomendaciones.....	100
Referencias.....	102
Apéndices	110
Apéndice 1	110
Apéndice 2.....	111
Apéndice 3.....	111
Anexos	113
Anexo 1.....	113
Anexo 2.....	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Organigrama de la organización _____	21
Figura 2 Diagrama del flujo general del proceso _____	25
Figura 3 Diagrama de Pareto inicial _____	29
Figura 4 Diagrama SIPOC para el UORS _____	68
Figura 5 Diagrama de Pareto secundario _____	70
Figura 6 Diagrama de Pareto terciario _____	71
Figura 7 Gráfica de tiempo efectivo y tiempo perdido _____	72
Figura 8 Disponibilidad general del equipo _____	72
Figura 9 Diagrama de Ishikawa para identificación de causas raíz _____	75
Figura 10 Hallazgos de obstrucciones en el sistema durante los paros para revisión y limpieza _____	78
Figura 11 Aislamiento térmico en la sección del sistema _____	79
Figura 12 Diagrama de flujo inicial de la sección del Front End Vacuum System _____	80
Figura 13 Propuesta de diseño de bypass en la línea del Front End Vacuum System _____	85
Figura 14 Orden de trabajo generada para la construcción del bypass _____	87
Figura 15 Orden de trabajo para mantenimiento semanal _____	88
Figura 16 Cálculo del TIR y el VAN con los datos obtenidos de las órdenes de trabajo _____	89
Figura 17 Secuencia de armado del bypass _____	91
Figura 18 Antes y después del ensamblado del bypass _____	92
Figura 19 Diagrama de Gantt para la programación del proyecto _____	93
Figura 20 Asistencia a la capacitación de uso y limpieza del Bypass en el Front End Vacuum System _____	96
Figura 21 Programa utilizado para elaborar las órdenes de trabajo para las actividades de mantenimiento _____	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de paros no programados del módulo UORS de 1 enero al 31 julio de 2024	29
Tabla 2 Resumen de la metodología para la definición del problema	57
Tabla 3 Resumen de la metodología para la medición y respaldo cualitativo del proyecto	59
Tabla 4 Resumen de la metodología para la propuesta de mejora	61
Tabla 5 Resumen de la metodología para la implementación del proyecto	63
Tabla 6 Resumen de la metodología para la etapa de control y seguimiento	65
Tabla 7 Relación entre causas raíz y propuestas de mejora del proyecto	84
Tabla 8 Inversión para diseño de la propuesta y capacitación del personal involucrado	86
Tabla 9 Resumen de paros no programados luego de la instalación del bypass	94

ACRÓNIMOS Y SIGLAS

API: American Petroleum Institute

Instituto Americano del Petróleo: Organización que desarrolla normas y estándares para la industria del petróleo y el gas.

ASTM: American Society for Testing and Materials

Sociedad Americana de Pruebas y Materiales: Organización que desarrolla estándares internacionales técnicos para materiales, productos, sistemas y servicios.

CAD: Computer-Aided Design

Diseño Asistido por Computadora: Uso de software para crear, modificar, analizar o optimizar diseños.

CEO: Chief Executive Officer

Director Ejecutivo: Máxima autoridad en la gestión y dirección administrativa de una organización.

DE: Disponibilidad del equipo

DMAIC: Define, Measure, Analyze, Improve, Control

Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar: Metodología de mejora continua utilizada en Six Sigma.

FMEA: Failure Mode and Effects Analysis

Análisis de Modo y Efecto de Falla: Herramienta para identificar, analizar y mitigar riesgos potenciales en un proceso o producto.

FNE: Flujo normal del equipo

IoT: Internet of Things

Internet de las Cosas: Red de dispositivos conectados que interactúan y comparten datos entre sí a través de internet.

LPS: Lube Polishing System

Sistema de Pulido de Lubricantes: Proceso diseñado para mejorar la calidad de los lubricantes mediante la eliminación de impurezas y contaminantes.

NMP: N-Methyl-2-Pyrrolidone

N-Metil-2-Pirrolidona: Disolvente químico usado en procesos industriales y de limpieza.

OEE: Overall Equipment Effectiveness

Eficiencia General del Equipo: Métrica que mide la efectividad de un equipo considerando disponibilidad, rendimiento y calidad.

PE: Pérdida económica

PLC: Programmable Logic Controller

Controlador Lógico Programable: Dispositivo electrónico usado para automatizar procesos industriales.

PYME: Pequeña y Mediana Empresa

Pequeña y Mediana Empresa: Negocios con tamaño y recursos limitados, fundamentales para la economía.

RE: Rendimiento del equipo

RECOPE: Refinadora Costarricense de Petróleo

Refinadora Costarricense de Petróleo: Empresa estatal de Costa Rica encargada de la importación, refinación y distribución de combustibles.

SES: Solvent Extraction System

Sistema de Extracción por Solvente: Tecnología utilizada para separar componentes mediante el uso de disolventes específicos, común en procesos industriales.

TIR: Tasa Interna de Retorno

Tasa Interna de Retorno: Indicador financiero que mide la rentabilidad de una inversión.

TPM: Total Productive Maintenance

Mantenimiento Productivo Total: Estrategia que busca maximizar la eficiencia de los equipos mediante mantenimiento preventivo y participación del personal.

UORS: Use Oil Recycling System

Sistema de Reciclaje de Aceite Usado: Proceso para recolectar, tratar y reutilizar aceites lubricantes usados, minimizando su impacto ambiental.

VAN: Valor Actual Neto

Valor Actual Neto: Indicador financiero que evalúa la viabilidad de un proyecto considerando los flujos de efectivo y su valor presente.

VGO: Vacuum Gas Oil

Gasóleo de Vacío: Fracción del petróleo obtenida del proceso de destilación al vacío, utilizada como materia prima para craqueo catalítico.

RESUMEN

Obando Ortiz, K. (2025) *Propuesta e Implementación de Mejora en el Proceso de Mantenimiento para el Sistema de Reciclaje de Aceite Usado (UORS) de la Empresa METALUB Planta Orotina en el Tercer Cuatrimestre 2024*. (Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Industrial), Universidad Hispanoamericana, Costa Rica. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo el diseño e implementación de una mejora en el proceso de mantenimiento del módulo UORS de la empresa Metalub. Se identificaron los principales factores que afectan la operación mediante un análisis de datos históricos y herramientas de mejora continua, lo que permitió determinar las causas raíz de los paros no programados y proponer una solución efectiva. La metodología utilizada incluyó el uso de gráficos de Pareto, análisis de causa raíz mediante la técnica de los cinco porqués y la evaluación de impacto económico mediante indicadores financieros como el VAN y el TIR. Los resultados obtenidos demostraron que la optimización del mantenimiento no solo reduce tiempos de inactividad, sino que también mejora la productividad y la rentabilidad del proceso productivo. Asimismo, se destacó la importancia de la capacitación del personal, la implementación de herramientas digitales de monitoreo y el fomento de una cultura organizacional orientada a la eficiencia y la sostenibilidad. La propuesta presentada fue validada como una alternativa viable para mejorar la operación de la empresa y garantizar un uso más eficiente de los recursos. Se concluye que la aplicación de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo permite mitigar los problemas operativos, optimizar la producción y contribuir al desarrollo sostenible del sector industrial.

CAPÍTULO I: PLANEAMIENTO DEL PROYECTO

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

La empresa Metatecnología Motriz MTM es una empresa pequeña que inició sus operaciones en agosto del año 2023. Dada la envergadura del proyecto, este arranque se hizo en varias etapas que se describirán más adelante en este documento. La instalación se realizó con personal de la planta en conjunto con una empresa subcontratada para la construcción de las tuberías y planos eléctricos. La puesta en marcha contó con el apoyo de tres extranjeros expertos en el proceso de re-refinación. A pesar de esto, y de contar con los manuales de los equipos, desde el inicio se presentaron constantes fallas en diferentes equipos que generaron retrasos en el inicio de la operación. (L. Miranda, comunicación personal, 11 de diciembre de 2023)

Este proyecto de graduación se enfoca en determinar los principales fallos que causan paros no programados y proponer una mejora en el proceso de mantenimiento del módulo de reciclaje de aceite usado.

Según las líneas de investigación que define la Universidad Hispanoamericana, este proyecto sigue la línea de Procesos de Producción, ya que este plan impacta directamente la eficiencia del proceso.

1.2 IDENTIFICACIÓN DE LA ORGANIZACIÓN DONDE SE REALIZA EL PROYECTO

1.2.1 Descripción general de la organización

Metatecnología Motriz MTM es una empresa dedicada a la re-refinación de aceites lubricantes usados y a la formulación de aceites lubricantes nuevos con aceites bases resultantes del proceso de re-refinación. El giro productivo se fundamenta en la economía circular, ya que toma un residuo peligroso y lo transforma en un producto

revalorizado. La empresa también se conoce como Metalub, que es el nombre de Fantasía y marca comercial de los lubricantes que se fabrican. En los siguientes párrafos se describen más detalles. (J. Jiménez, comunicación personal, 13 de junio 2023)

1.2.1.1 Localización e infraestructura

La planta está ubicada en el Parque Industrial La Ceiba, Orotina, cercana al kilómetro 66 de la Ruta 27, de la entrada a la bomba Delta, 300 metros al oeste, 200 metros al norte y 500 metros oeste. El terreno de 10 000 m² cuenta con un edificio de aproximadamente 1100 m² donde se encuentran las oficinas administrativas, el comedor, baterías de baños, laboratorio de control de calidad, área de mezclado y bodega de materias primas y lubricantes terminados. Hay otro edificio más pequeño, de aproximadamente 100 m² donde se encuentra un departamento de reciclaje de filtros de aceite y limpieza de filtros de aire. Los módulos donde se da el proceso de re-refinación ocupan 500 m². Se encuentra otro espacio donde se cargan y descargan las materias primas y productos terminados con 100 m² de extensión y, por último, otra área que ocupan los tanques donde se almacenan las materias primas, productos intermedios y productos terminados del proceso de re-refinación, que ocupa aproximadamente 700 m². (L. Miranda, comunicación personal, 29 de agosto de 2023)

1.2.1.2 Misión

Elaborar productos de alta calidad, certificados por el Instituto Americano del petróleo (API, American Petroleum Institute) y de alto valor agregado ambiental que brinden

soluciones al sector automotriz y cuyo proceso de fabricación constituya la vía más limpia y ecoamigable para el tratamiento de aceite usado.

1.2.1.3 Visión

Ser líderes regionales del mercado de lubricantes, reconocidos por el fomento de la economía circular y por el desarrollo de procesos exitosos, eficientes y amigables con el ambiente.

1.2.1.4 Valores

1.2.1.4.1 Integridad. Todos nuestros colaboradores, alta gerencia e inversores trabajan y desarrollan sus labores con honestidad y transparencia.

1.2.1.4.2 Innovación. Fomentamos la creatividad, el pensamiento disruptivo y la mejora continua.

1.2.1.4.3 Responsabilidad social y ambiental. El medio ambiente es el más beneficiado con nuestros procesos, ya que se reduce significativamente la contaminación del suelo, del agua y de la atmósfera.

1.2.1.4.4 Enfoque basado en datos. Todos nuestros procesos y decisiones se basan en datos obtenidos a partir de información completa y confiable. (J.Jiménez, comunicación personal, 16 de enero de 2024)

1.2.1.5 Recurso Humano

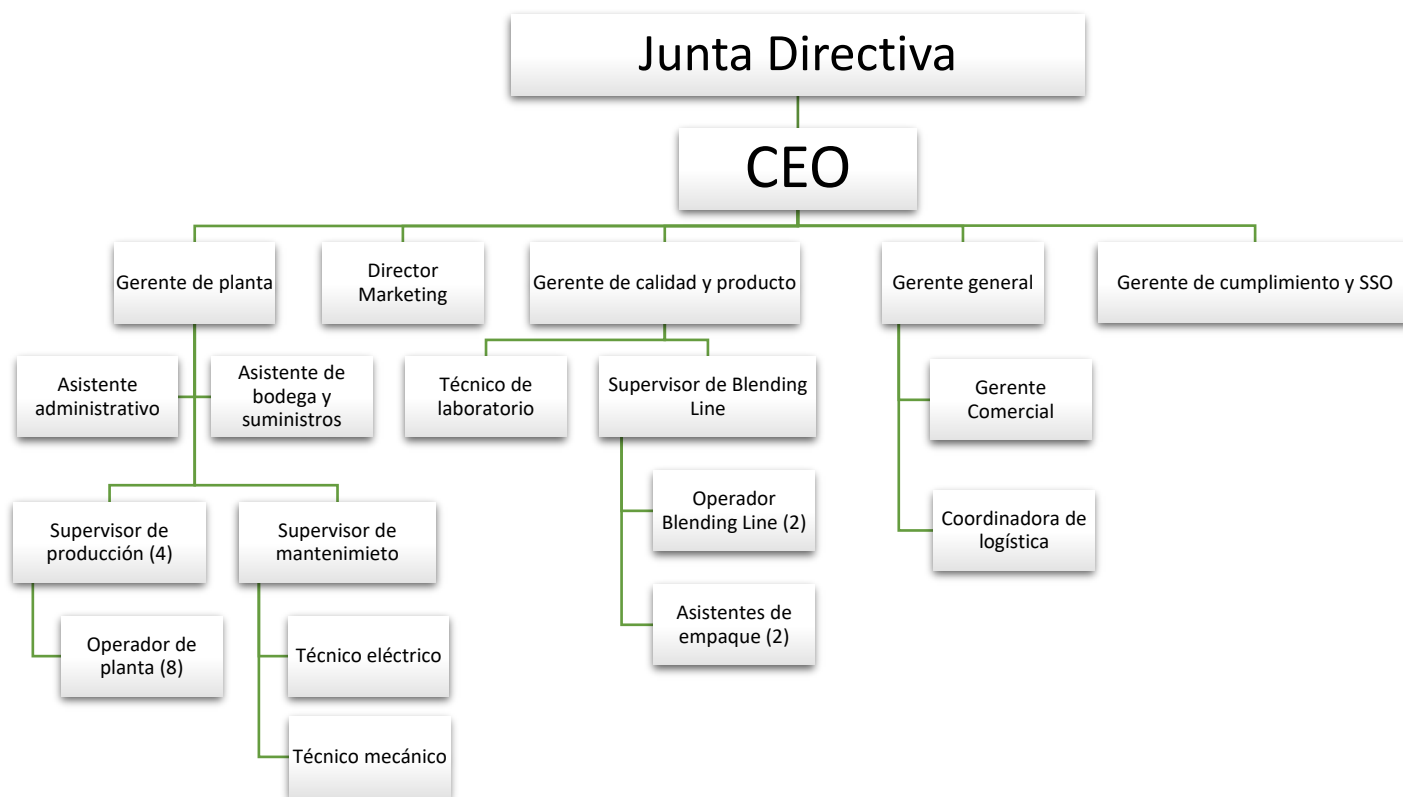
Actualmente MTM pertenece a un grupo corporativo que separa la parte comercial de la parte productiva. La operación en Orotina cuenta con 30 colaboradores. El departamento de re-refinación trabaja a dos turnos de 12 horas en jornada 4x3,

mientras que el área administrativa y de mezclado trabaja un solo turno diurno ordinario.

Los puestos de gerencia y supervisiones requieren colaboradores con experiencia en industria y manejo de personal. Los puestos de técnico de laboratorio, encargado de bodega, encargados de mantenimiento y asistente administrativo deben contar con títulos universitarios o certificados que les califiquen para cada puesto. Los demás puestos requieren solamente secundaria completa. (L. Miranda, comunicación personal, 18 de enero de 2024)

1.2.1.6 Estructura organizativa

Figura 1 Organigrama de la organización



Fuente. Elaboración propia.

1.2.1.7 Productos y servicios

La empresa tiene cuatro departamentos diferentes que tienen diversos productos y servicios.

El primer departamento es el de re-refinación, que se compone de tres módulos. El módulo de Use Oil Recycling System (UORS), también conocido como Planta de Destilación de Aceite Usado genera 5 subproductos que se enlistan a continuación:

1. Vacuum gas oil de baja viscosidad (VGO 120): es un aceite derivado de la destilación al vacío, pero no lo suficientemente depurado para comercializarse como aceite base.
2. Vacuum gas oil de alta viscosidad (VGO 240): es un aceite derivado de la destilación al alto vacío, pero no lo suficientemente depurado para comercializarse como aceite base.
3. Combustibles: estos se utilizan para el abastecimiento de una caldera y de un fluido térmico dentro del mismo proceso productivo.
4. Asfalto de baja viscosidad: este se comercializa como combustible para hornos, generalmente en plantas productoras de cemento.
5. Agua oleosa: este es el único subproducto no aprovechable del UORS y se le da una disposición a través de una empresa gestidora de residuos al considerarse como un residuo peligroso. (J. Winniky, comunicación personal, 19 de diciembre de 2023)

El módulo del Solvent Extraction System (SES) se encarga de mejorar los Vacuum Gas Oil o VGOs a través de la extracción por solventes convirtiéndolos en aceites

lubricantes base con características del Grupo I. Entre estas mejoras se encuentran las siguientes:

- Aumento de los hidrocarburos saturados de un 3 a 5%.
- Disminución de los niveles de azufre.
- Mejora drásticamente el color del aceite de ASTM 4.0 - 7.0 (ámbar medio a ámbar oscuro), hasta ASTM inferior a 1,0 - 1,5 (dorado pálido a claro).
- Mejora significativa de la estabilidad del aceite base (sin deterioro del color ni formación de sólidos durante el almacenamiento).
- Reducción efectiva del contenido de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos por debajo de niveles detectables.
- Reducción notable del olor. (Hamsa Environmental Solutions, 2019)

En resumen, el Solvent Extraction System transforma el VGO 120 y VGO 240 en aceite base grupo I de baja viscosidad y en aceite base grupo I de alta viscosidad respectivamente.

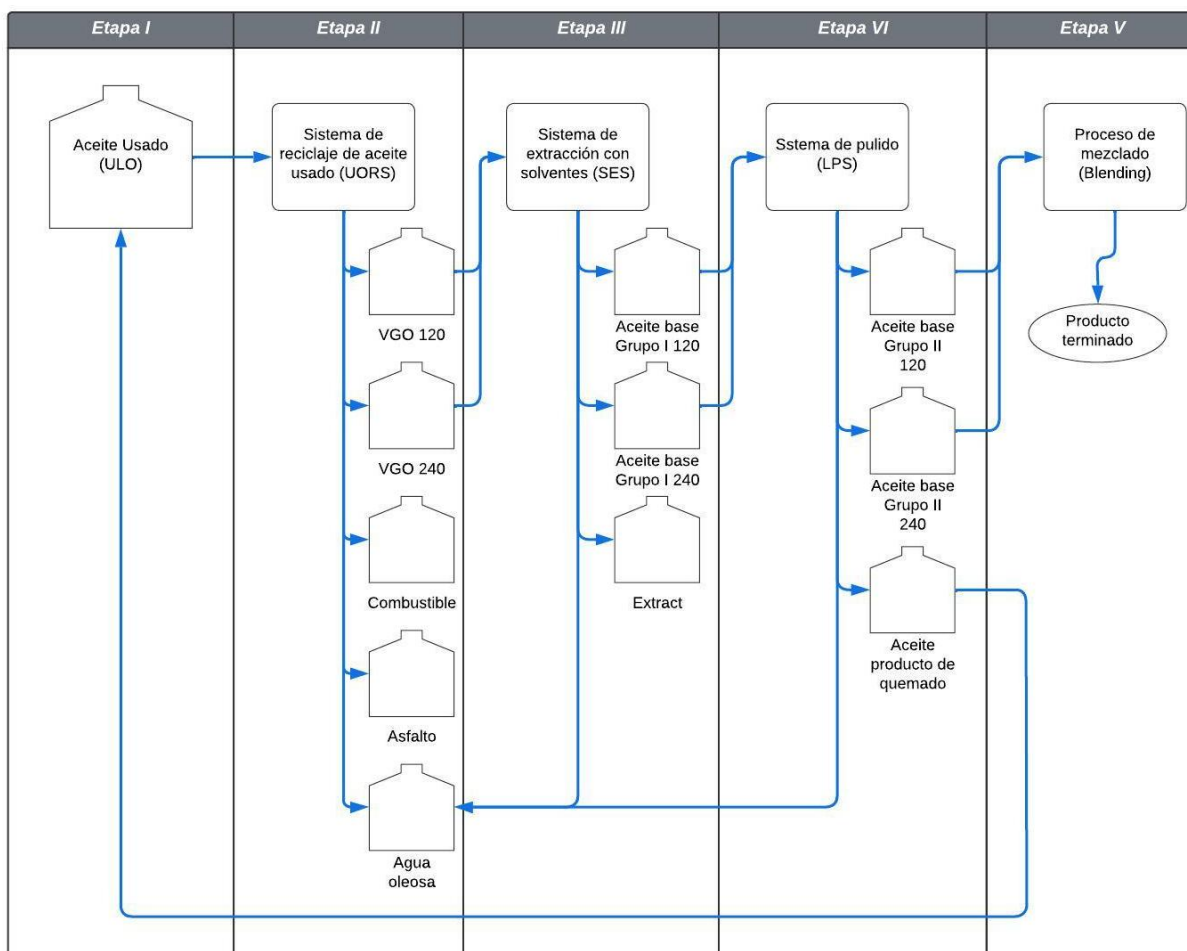
El último módulo es el Lube Pullishing System (LPS), es la etapa final del todo el proceso de re-refinado y se encarga de eliminar restos de partículas extra finas que no fueron capturadas o separadas en las etapas anteriores, además de eliminar trazas de agua que todavía pudieran estar presentes. Este proceso de filtrado y adsorción se realiza usando columnas rellenas de bauxita (comúnmente llamada arcilla) en las que el aceite base grupo I pasa a través bajando la concentración de azufre y reduciendo aún más el color, transformándolo en aceites base grupo II listos para su comercialización o para ser mezclados para la producción de los diferentes lubricantes. (Hamsa Environmental Solutions, 2019b)

Otro departamento es el de fabricación de aceites lubricantes, para el cual se utilizan los aceites base re-refinados en planta en conjunto con aditivos especializados que se importan de Estados Unidos y Europa. Se fabrican cinco aceites lubricantes para motor gasolina, dos aceites para motocicleta, tres para motor diésel, uno de ellos de tipo multigrado, cuatro aceites hidráulicos, cinco aceites de transmisión y tres aceites multifunción monogrado de tipo TO-4. Estos aceites se empaquetan en cuatro presentaciones diferentes, estañones de 208 L, pichingas de 18,927 L, galones con 3,785 L y cuartos con 0,946 L. (M. Araya, comunicación personal, 30 agosto 2023)

Aparte de la manufactura, también hay un tercer departamento donde se tratan dos tipos de filtros. Este departamento recibe filtros de aceite generados a partir de los cambios de aceite de motores de combustión interna. Estos filtros llegan todavía con remanentes de aceite usado en su interior, por lo que se introducen en una máquina que los compacta y extrae el exceso de aceite, generando ladrillos metálicos de aproximadamente 20 kg que se colocan en un contenedor durante tres semanas para terminar de drenar los últimos restos de aceite y finalmente se venden como material de reciclaje. Además, al comprimirse, se obtiene también una cantidad de aceite usado que se introduce al proceso de re-refinación. Los filtros de aire se reciben sucios y se colocan en un equipo de limpieza que, con un flujo de aire limpia los filtros, luego se les hace una revisión de presión para comprobar que el filtro quedó funcional y también se revisa con una luz potente para revisar que el filtro no tenga defectos como huecos o deformaciones que afecten su funcionamiento. Se ha definido que, mientras el filtro no tenga defectos físicos, la limpieza se puede hacer de seis a siete veces, ahorrándole al cliente la compra de filtros nuevos cada vez que se saturan. (L. Miranda, comunicación personal, 29 de agosto de 2023)

El cuarto departamento es el de calidad, que cuenta con un laboratorio de punta, equipado con los equipos más especializados de Centroamérica, y que, además de darle soporte a todos los procesos de la planta, vende servicios de análisis. (T. Barnett, comunicación personal, 31 de agosto de 2023)

Figura 2 Diagrama del flujo general del proceso



Fuente: Elaboración propia.

1.2.2 Antecedentes de la organización

Metalub es una pequeña empresa que nació a partir de la visionaria idea de tres amigos alrededor del año 2011. Desde el 2008 fueron dando forma a la idea e

investigando la viabilidad de un proyecto que fuera económicamente factible y que además tuviera un impacto positivo en el ambiente. Encontraron en Estados Unidos un proceso eficiente de re-refinación de aceite usado, a partir del cual se limpia el aceite y con el proceso se obtiene un aceite base renovado, con las mismas o mejores características que el aceite obtenido del primer refinamiento de petróleo crudo.

Esta idea encajaba perfectamente con el pensamiento empresarial de los fundadores, y decidieron iniciar su emprendimiento. Inicialmente el giro de empresa se enfocó en recolectar aceite usado, enviarlo a Estados Unidos para re-refinarlo, maquilar lubricantes certificados utilizando su aceite base re-refinado, y devolver el producto terminado a Costa Rica para su comercialización utilizando la marca registrada METALUB.

Esa primera etapa inició en el año 2015 con la empresa Lubricantes Next Gen LNG. Conforme se fue dando a conocer el producto, y ganando clientes, surgió la oportunidad de una segunda etapa, donde se abrieron tres locales con el servicio de lubricentro y mecánica rápida, llamados Metacentros, ubicados en los Walmart de Escazú, Guadalupe y Cartago. Estos Metacentros utilizan productos marca Metalub y brindan al cliente la facilidad de análisis de sus aceites para conocer el estado de sus vehículos.

Con el gran crecimiento y aumento de la demanda de lubricantes Metalub, se decidió apostar por la búsqueda de inversionistas, tanto locales como extranjeros, y plantear la posibilidad de montar la primera planta de re-refinación de aceite usado en Centroamérica. (J. Jiménez, comunicación personal, 29 de agosto de 2023)

Actualmente es una realidad, en el año 2023 se abrió la planta iniciando su etapa de montaje y start up entre los meses de agosto y diciembre. Este arranque también se

realiza en etapas, una inicial de construcción de las instalaciones físicas, la cual concluyó en enero de 2023. Como primer objetivo se estableció la puesta en marcha de las operaciones del departamento de limpieza de filtros y compactación de filtros, que son actividades paralelas al giro principal de la empresa. Una tercera etapa que consistió en el acondicionamiento y puesta en marcha del laboratorio de análisis, el cual tiene la responsabilidad de velar por la calidad de los productos manufacturados en planta, pero que también vende servicios de análisis a clientes externos.

La siguiente etapa fue la implementación y puesta en marcha del departamento de mezclado, empaque y etiquetado de aceites lubricantes, que se realizó inicialmente con materias primas importada, y generó su primer lote de producto terminado en agosto de 2023. Y la etapa final fue la implementación del sistema de re-refinación de aceite usado, el cual inició con solamente dos módulos para la producción de aceite re-refinado, y en el mes de junio de 2024 se empezó el montaje del módulo de extracción, el cual se puso en marcha en el mes de julio de 2024. (J. Jiménez, comunicación personal, 29 de agosto de 2023)

Es importante destacar que la filosofía y motor de la empresa se basa en la modalidad de economía circular, con el objetivo de promover la conservación del medio en conjunto con la generación de conciencia y responsabilidad ambiental en la población costarricense.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1 Definición y medición del problema

A pesar de ser una planta muy nueva, con equipo recién instalado, se han encontrado muchos fallos en equipos que generan paros no programados del proceso. La capacidad instalada de la planta permite trabajar 24/7, parando solamente 30 días al año para mantenimientos. Sin embargo, entre el mes de enero y setiembre la planta ha tenido que parar por diversas situaciones que se detallan en la tabla 1. Esta tabla resume las causas y contabiliza los tiempos totales de paro, en minutos, por cada causa.

La información se extrajo de la bitácora de trabajo de los módulos en funcionamiento y una tabla más amplia, con fechas se puede encontrar en el Apéndice 1.

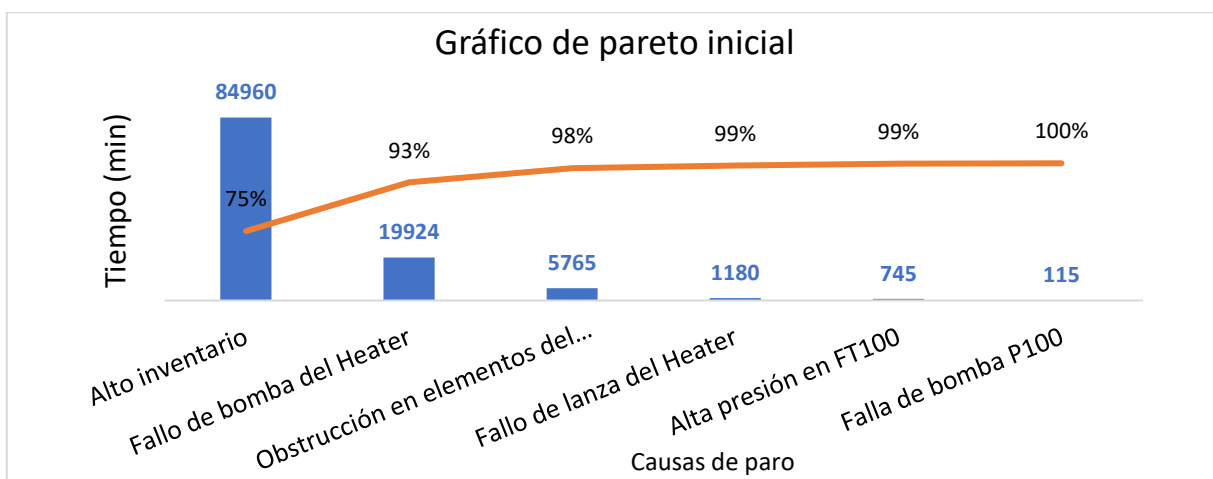
Es importante aclarar que se toman en cuenta solamente los paros del UORS a partir del mes de enero de 2024, ya que el equipo empezó operaciones el 15 de noviembre del año 2023, y durante ese tiempo se dieron varios paros que no se tomarán en cuenta, pues eran parte de la puesta en marcha del equipo, y también para la capacitación del personal a cargo.

Con el fin de comprender y analizar el estado actual del equipo, se realizó una caracterización de los paros por fallo eléctrico, por fallo mecánico y por producción. Derivado de la tabla 1, se realiza un Diagrama de Pareto para identificar las causas principales de paros en cuanto al tiempo que pasa detenida la planta.

Tabla 1 Resumen de paros no programados del módulo UORS de 1 enero al 31 julio de 2024

Causa de paro	Tipo de falla	Tiempo total en paro (min)
Alto inventario	Producción	82080
Fallo de bomba del Heater	Mecánico	22149
Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System	Mecánico	5765
Fallo de lanza del Heater	Mecánico	1180
Alta presión en FT100	Mecánico	745
Falla de bomba P100	Mecánico	115
Externa	Eléctrico	193
Fallo en el sistema de aterrizado	Eléctrico	200
Fallo de comunicación con PLC	Eléctrico	62
Fuga en tubería	Mecánico	60
	Suma	112549

Figura 3 Diagrama de Pareto inicial



Fuente: Elaboración propia

En el diagrama anterior se observa que las dos causas principales de paro representan un 93% de los paros, siendo la principal causa los altos inventarios y la segunda causa el fallo de la bomba del heater. La situación de los altos inventarios no es causada por el proceso de mantenimiento y se considera una causa externa.

También la tabla 1 muestra que, entre enero y julio del año 2024, los paros no programados se contabilizaron en 112 549 minutos. El equipo está dispuesto para trabajar de forma continua por 24 horas, y el fabricante recomienda un mes de mantenimiento preventivo por año. La revisión de la bitácora se realizó del primero de enero al 31 de julio del 2024, por lo que se tomaron en cuenta los primeros 7 meses del año. En este periodo, la disponibilidad total del equipo se calculó en 306 720 minutos, es decir, el equipo solamente se mantuvo productivo un 63,3 % de su tiempo disponible total. Las situaciones de alto inventario no se pueden controlar porque las maneja un ente externo, tanto la entrega de materia prima como la comercialización de los productos terminados, por lo que no se aborda en este proyecto. El fallo en la bomba del Heater fue tan recurrente desde el inicio de la operación, que la gerencia decidió repararlo antes de presentar la propuesta de este proyecto. La siguiente causa en gravedad es la obstrucción en los elementos del Front End Vacuum System. El tiempo perdido por esta causa es de 5765 minutos, dando un promedio de 823,6 minutos al mes.

El módulo UORS produce, en promedio, 7,7 litros por minuto de VGO. Si bien es cierto, el VGO es un producto intermedio, este se puede comercializar como aditivo mejorador de combustibles, con un costo de ¢410 por litro. Por lo que las pérdidas económicas por ingresos no percibidos ascienden a ¢18.200.105. Si todo ese VGO se comercializara como aceite base re-refinado, cuyo valor es de ¢470 por litro, las pérdidas serían aún mayores, alcanzando un valor de ¢20.863.535. Actualmente, la estrategia comercial de la empresa es vender VGO para mantener el flujo de caja, pues la salida de los lubricantes como producto terminado es lenta y se continua en

búsqueda de clientes de aceite base re-refinado, lo que refleja la importancia de mantener el UORS operativo la mayor parte de su tiempo disponible.

Las evidencias anteriores muestran que la empresa está enfrentando dificultades en el mantenimiento de las máquinas, provocando paros no programados que generan baja productividad y significativas pérdidas económicas.

1.3.2 Justificación del proyecto

Anteriormente se expuso el perjuicio económico derivado de los paros no programados causados por fallos mecánicos. Este proyecto busca proponer e implementar una mejora en el proceso de mantenimiento que permitiría disminuir estos paros, principalmente los que hacen para solventar mantenimientos correctivos. Esta propuesta permitiría que estos paros se evitaran mejorando mantenimiento predictivo y preventivo, impactando de manera directa la productividad de la operación.

En lo personal, este proyecto también permite demostrar que los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Industrial, y a lo largo de la experiencia laboral propia, son suficientes y esenciales para el abordaje de problemas relacionados a la eficiencia productiva, así como procesos de gestión de calidad y sistemas integrados de gestión. Es satisfactorio mostrar que estas ideas aportan valor a la empresa, impactan directa y positivamente el giro del negocio y contribuyen también al crecimiento profesional y personal de quien ejecuta el proyecto.

1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.4.1 Objetivo general

- Diseñar e implementar una mejora en el proceso de mantenimiento del módulo UORS de la empresa Metalub con el fin de disminuir los paros no programados y aumentar el indicador OEE de la operación.

1.4.2 Objetivos específicos

- Recolectar y analizar los datos sobre el proceso de mantenimiento actual mediante revisión de bitácoras de producción.
- Elaborar una propuesta de mejora para el proceso de mantenimiento basada en los requerimientos de los equipos, con el fin de disminuir los paros no programados relativos a procesos de mantenimiento.
- Evaluar el beneficio-costado del proyecto para determinar la viabilidad de la implementación de la propuesta.
- Implementar la propuesta de mejora y evaluar la efectividad del proyecto.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.5.1 Alcances

El proyecto se propone para el módulo de reciclaje de aceite usado (UORS) de la empresa Metatecnología Motriz MTM en su planta de La Ceiba de Orotina, durante los turnos diurnos en horarios de 6:00 a.m. a 3:00 pm.

El estudio de los paros se inicia en agosto, tomando en cuenta los paros presentados del primero de enero del 2024 hasta el 31 de julio del 2024. La fase de implementación de mejoras se inicia en octubre del 2024, y la fase de seguimiento y control finaliza el 31 de diciembre del 2024.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 MARCO CONCEPTUAL GENERAL RELATIVO A LA CARRERA

2.1.1 Impacto de la ingeniería en la industria petrolera

El pensamiento ingenieril se aplicó en la industria petrolera desde el siglo XIX, cuando Edwin L. Drake perforó con éxito el primer pozo de petróleo en 1859 en Titusville, Pensilvania. Este hito fue considerado el nacimiento de la industria petrolera moderna, ya que marcó el inicio de la explotación comercial de los yacimientos de petróleo. Antes de esto, el petróleo se recogía principalmente de filtraciones naturales y se utilizaba para fines limitados, como combustible para lámparas. (Yergin, 2011)

A medida que la demanda de petróleo creció, la ingeniería petrolera se convirtió en una disciplina esencial para optimizar la extracción y producción. La invención de nuevas tecnologías, como la perforación rotatoria, permitió acceder a depósitos de petróleo más profundos, lo que mejoró significativamente la eficiencia y la capacidad de producción. Estos avances fueron cruciales durante la expansión del uso del petróleo en el siglo XX, en particular con la creciente demanda de combustibles para automóviles y, posteriormente, para la aviación. (Hyne, 2012)

Durante el siglo XX, la ingeniería en la industria petrolera continuó evolucionando con el descubrimiento de grandes yacimientos en Oriente Medio y América Latina, así como en plataformas marinas. La perforación en alta mar comenzó a desarrollarse en la década de 1940, y generó un desafío técnico importante, pero abrió nuevas fronteras para la exploración de recursos en áreas que antes no se tenían contempladas por la dificultad de su acceso y condiciones. Esto impulsó el desarrollo de tecnología submarina avanzada y plataformas flotantes, lo que permitió la explotación de reservas en aguas profundas. En el siglo XXI, la ingeniería petrolera enfrentó nuevos desafíos,

incluyendo la necesidad de tecnologías más eficientes y limpias para reducir el impacto ambiental, así como la incorporación de técnicas avanzadas como la perforación horizontal y la fracturación hidráulica. Estos avances han permitido explotar yacimientos no convencionales, como el petróleo de esquisto, lo que ha transformado significativamente la industria. A pesar de los retos actuales, la industria petrolera sigue siendo fundamental para satisfacer la demanda global de energía. (Selley, 1998)

2.1.2 Procesos de separación del petróleo

La separación del petróleo en diferentes compuestos es fundamental para convertir el crudo en productos utilizables. La destilación fraccionada es uno de los métodos más empleados en las refinerías. Este proceso separa los componentes del crudo en función de sus diferentes puntos de ebullición, permitiendo la obtención de fracciones como la gasolina, el queroseno y el gasóleo. Esta técnica requiere de columnas de destilación y operan bajo condiciones específicas que maximizan la eficiencia del proceso. (Herrera, León, Jaramillo, Arias, & León, 2024)

La destilación con alto vacío es otro método de separación que se utiliza principalmente para productos más pesados que serían susceptibles de descomposición a altas temperaturas. Este método permite operar a presiones mucho más bajas, lo que reduce la temperatura de ebullición de los compuestos y minimiza el riesgo de daño térmico. Esto es particularmente útil para obtener gasolina y otros productos ligeros de alta calidad a partir de fracciones más pesadas del crudo. (Atta, Khan, & Ali, 2024)

Otro proceso relevante es la destilación catalítica, que combina la destilación fraccionada con la catálisis para mejorar la calidad del producto final y aumentar el rendimiento de combustibles más ligeros. Estos procesos no solo aumentan la cantidad de productos obtenidos, sino que también mejoran sus propiedades físicas y químicas, haciendo que sean más eficientes y menos contaminantes. (Kozhakhmetova, Kaliyeva, & Sugurova, 2024)

Además de los métodos antes mencionados, los más innovadores optan por tecnologías sostenibles ambientalmente, como la separación electrostática y técnicas de adsorción, que minimizan el uso de energía y la generación de residuos. Estas tecnologías emergentes representan una evolución necesaria hacia prácticas más responsables dentro del sector, que históricamente ha sido visto como un generador de compuestos altamente contaminantes. (Politiek, Dijkink, & Van den Boogaard, 2023)

2.1.3 Diferentes usos de los derivados del petróleo

Los derivados del petróleo son fundamentales en diversas industrias y aplicaciones, lo que hace que esta actividad sea muy importante en la economía global. Uno de los usos más conocidos es la producción de combustibles, como la gasolina y el diésel, que impulsan el transporte terrestre, aéreo y marítimo. Estos combustibles son vitales para el funcionamiento de vehículos, maquinaria pesada y aeronaves, lo que a su vez es crucial para la movilidad de personas y mercancías a nivel mundial. Además, los derivados del petróleo también son esenciales en la generación de energía eléctrica,

especialmente en plantas que utilizan combustibles fósiles para la producción de electricidad.

Otra aplicación significativa de los derivados del petróleo se encuentra en la manufactura de productos químicos y materiales. Los petroquímicos, que se derivan de la refinación del petróleo, son la base de una amplia gama de productos, incluidos plásticos, detergentes, fertilizantes y sustancias químicas industriales. Estos productos están presentes en la vida cotidiana en todos los aspectos, desde envases de alimentos hasta componentes electrónicos y productos de limpieza. La polimerización de hidrocarburos permite crear plásticos de diversas calidades, tipos y usos, por lo que los derivados del petróleo son esenciales para el desarrollo de la industria moderna y la innovación. (Alfares, 2023)

Los derivados del petróleo también se utilizan en la producción de lubricantes industriales y aceites base para motores y maquinaria. Los lubricantes son cruciales para el funcionamiento eficiente y prolongado de las maquinarias, reduciendo fricciones y el desgaste de partes móviles, mejorando así el rendimiento y la vida útil del equipo. Asimismo, los aceites derivados son utilizados en la fabricación de productos cosméticos, fármacos y hasta en la industria alimentaria, donde ciertos hidrocarburos pueden servir como componentes en la elaboración de alimentos procesados. La versatilidad de los derivados del petróleo resalta su importancia continua en múltiples sectores económicos y su impacto en la vida cotidiana. (Santillán, Montoya, & Suárez, 2019)

El impacto del uso del petróleo también se extiende a su relación con la energía. Los derivados del petróleo son usados principalmente para el suministro de energía global, sin embargo, aumenta cada vez más la diversidad de fuentes renovables que están

siendo exploradas con el fin de suplantar los derivados del petróleo. Esto representa una transición crucial hacia un futuro más sostenible y menos dependiente de combustibles fósiles. Las iniciativas que integran tecnología y sostenibilidad facilitarán el avance hacia un sistema energético más equilibrado. (Añez, 2022)

2.1.4 Características y usos de los aceites base

Los aceites base son el componente clave en la formulación de lubricantes y otros productos petroquímicos. Su clasificación se basa en propiedades como la viscosidad, la volatilidad y el índice de viscosidad (IV), que determina el grado en que la viscosidad de un líquido cambia con la temperatura. Los aceites base de Grupo I, derivados de la destilación del petróleo convencional, son los más comunes, pero los aceites de Grupo II y III, que son procesados con técnicas de destilación en alto vacío e hidrotratamiento, ofrecen una mejor estabilidad y menor generación de residuos durante su uso.

Los aceites base se utilizan en una variedad de aplicaciones, desde lubricantes para motores hasta fluidos hidráulicos. Su calidad afecta directamente el rendimiento y la durabilidad de los equipos en los que se aplican, lo que hace que la industria busque constantemente mejorar sus características a través de refinaciones y aditivos. En la actualidad, con el crecimiento de vehículos eléctricos y tecnologías alternativas, los aceites base están siendo adaptados para nuevas aplicaciones que requieren un mejor rendimiento a temperaturas extremas y mayor eficiencia. (Lee, 2024)

2.1.5 Disposición final de los residuos de productos derivados del petróleo

En cuanto a la disposición final de los residuos, la industria petrolera enfrenta enormes desafíos. La gestión de residuos derivados de productos petroquímicos es fundamental no solo para minimizar el impacto ambiental, sino también para cumplir con las normativas reguladoras que se encuentran en constante evolución. La disposición inadecuada de estos residuos puede llevar a la contaminación del suelo y el agua, afectando a comunidades y ecosistemas locales y globales. Por lo tanto, muchas refinerías están aplicando técnicas más sostenibles de gestión de residuos que incluyen el reciclaje y la reutilización de materiales. (Petrobras, 2024)

Una de las soluciones más prometedoras es el proceso de re-refinación de aceites usados, que permite recuperar y reutilizar aceites que de otro modo serían desechados. Este proceso se profundizará en la siguiente sección.

2.1.6 Procesos de re-refinación de aceites usados

La re-refinación de aceites usados es un proceso que permite la recuperación y reutilización de aceites lubricantes que, de otro modo, serían descartados. Este método contribuye significativamente a la sostenibilidad en la industria del petróleo, ya que reduce la necesidad de producción de aceites nuevos, disminuyendo así el impacto ambiental asociado con la extracción de crudo y el proceso de refinación inicial. La re-refinación generalmente implica varias etapas, como la deshidratación, la filtración y la destilación, que ayudan a eliminar impurezas y restablecen las propiedades del aceite.

Los sistemas de re-refinación han sido optimizados a través de tecnologías como el uso de catalizadores y tratamientos químicos, que mejoran la eficiencia del proceso y la calidad del producto final, resultando en aceites reciclados de alta calidad que son utilizables en aplicaciones industriales o de transporte. Esta práctica no solo ofrece beneficios ambientales al reducir la cantidad de desechos generados, sino que también tiene ventajas económicas, ya que el costo de procesar aceites usados generalmente es menor que la compra de aceites nuevos. (Ahmed, Raad, Chali, & Bahjat, 2024)

La industria está viendo un aumento en la implantación de normativas que promueven la re-refinación de aceites usados, lo que ha llevado a un crecimiento en este sector. Sin embargo, a pesar de estos avances, aún son necesarios mayores esfuerzos para aumentar la conciencia sobre la importancia de la recolección, el manejo y el tratamiento adecuado de los aceites usados, así como para incentivar a las empresas a buscar opciones de re-refinación para tratar sus aceites usados.

2.1.7 Mantenimiento industrial

El mantenimiento industrial es un conjunto de prácticas y estrategias diseñadas para garantizar que los equipos y sistemas en plantas de producción operen de manera eficiente y segura. Su objetivo principal es prevenir averías inesperadas y minimizar el tiempo de inactividad, lo que puede resultar costoso para las empresas. Existen diversos tipos de mantenimiento, como el mantenimiento preventivo, que se lleva a cabo de forma programada para evitar fallas, y el mantenimiento correctivo, que se realiza tras la identificación de un problema. La implementación de un mantenimiento

efectivo permite a las empresas no solo extender la vida útil de sus equipos, sino también optimizar la productividad y reducir costos operativos. (Silvestri, Forcina, Introna, Santolamazza, & Cesarotti, 2020)

2.1.8 Importancia del mantenimiento industrial en una operación

El mantenimiento industrial es un componente crítico de la operación de cualquier planta de producción, ya que asegura el correcto funcionamiento de los equipos y sistemas involucrados en la fabricación. La importancia de un programa de mantenimiento bien estructurado radica en su capacidad para prevenir fallos imprevistos que pueden interrumpir las operaciones, lo que a su vez puede resultar en pérdidas financieras significativas. Al reducir el tiempo de inactividad y garantizar que las máquinas operen en su máxima capacidad, las empresas pueden aumentar su productividad y competitividad en el mercado. Además, un enfoque proactivo en el mantenimiento permite detectar y corregir problemas potenciales antes de que generen daños costosos, prolongando la vida útil de los activos y optimizando el rendimiento general. (Bokrantz, Skoogh, Berlin, Wuest, & Stahre, 2020)

2.2 MARCO CONCEPTUAL ATINENTE A LA GESTIÓN DEL PROYECTO

La metodología DMAIC, cuyas letras significan Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar, es una estrategia de mejora de procesos basada en datos que ha sido ampliamente adoptada en la industria para optimizar la producción y reducir costos.

Este enfoque está intrínsecamente ligado a la filosofía Six Sigma, la cual propone la eliminación de defectos y la mejora continua en los procesos. La implementación efectiva de la metodología DMAIC no solo mejora los resultados productivos, sino que también fomenta una cultura de mejora continua dentro de las organizaciones industriales, lo que es esencial para enfrentar los desafíos de un sector en constante cambio como el del petróleo.

2.2.1 Definir

Comenzando con la fase de Definir, se identifican claramente los problemas y se establecen objetivos de mejora específicos. Esto es crucial en industrias donde los costos y los márgenes son altamente competitivos. (Nsekuye, Erramli, Elouadi, Gretete, & Mushirabwoba, 2024)

La etapa de definición es la que le da rumbo al proyecto, y permite establecer el alcance y los objetivos del proyecto.

Existen gran diversidad de técnicas para cada etapa de la aplicación de la metodología DMAIC en un proyecto. Las técnicas son versátiles y pueden aplicarse a varias etapas de la metodología dependiendo de lo que se requiera. Para la etapa de definición una de las herramientas más utilizadas es el Gráfico de Pareto, el cual es una herramienta gráfica que se determina a partir de mediciones estadísticas. Esta técnica se basa en el principio de Pareto, que aplica la regla 80/20, donde se puede interpretar que el 80% de los efectos de una situación se puede atribuir a un 20% de las causas. De esta forma, al atacar ese 20% de causas, se disminuye la mayor cantidad de efectos. El gráfico normalmente se representa con la frecuencia de aparición de los efectos con barras verticales, en orden descendiente, del más al menos frecuente, y su

correspondiente porcentaje acumulado graficado como una línea en un eje secundario. (Gallach, Gisbert, Pérez, & Perez-Bernabeu, 2020)

2.2.2 Medir

La fase de medir implica la recopilación de datos relevantes sobre el proceso previo a la implementación de algún cambio, utilizando herramientas estadísticas para identificar métricas críticas de rendimiento. Si el problema definido en la etapa anterior no puede medirse, pues no es posible validarlo como un problema real. Por ejemplo, en una re-refinería, esto puede incluir la evaluación de la eficiencia en la conversión de aceite usado a productos re-refinados.

Para poder medir se requiere de la revisión y recolección de datos que permitan tener un panorama inicial del proyecto, incluso evaluar índices con el fin de compararlos con los resultados al implementar los cambios, como forma de determinar si el proyecto tuvo realmente un impacto positivo en las métricas. En la actualidad, la mayoría de procesos e industrias hacen la tabulación de resultados en programas ERP o, cuando hay menor presupuesto, en programas más sencillos como Microsoft Excel, Power BI, SQL, entre otros.

Los diagramas de flujo también son herramientas indispensables en el desarrollo de un proyecto, ya que permiten tener un panorama simplificado del proceso y muestra el camino desde las materias primas hasta el producto terminado, incluyendo procesos importantes como los controles de calidad y la toma de decisiones a partir de resultados. Para la elaboración de los diagramas de flujo, se usan íconos o formas estandarizadas que se refieren a acciones diferentes durante el proceso y donde también se pueden presentar equipos especiales como válvulas o equipos de medición

de diferentes variables. Un diagrama de flujo puede ser tan general o específico como el proceso lo requiera. Las formas geométricas que se usan de forma estandarizada son las siguientes:

Óvalo: Se usa para las entradas y salidas del proceso, los ingresos y los resultados.

Rectángulo: Es la forma usada para acciones dentro del proceso. Pueden ser operaciones unitarias o actividades específicas.

Rombo: Aquí se identifican las tomas de decisiones durante el proceso.

Flechas: Las flechas indican el flujo del proceso y permiten conectar las otras formas entre sí para darle el sentido de orientación al proceso.

Paralelogramo: Se usa para indicar entrada o salida de datos. (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2022)

Se aplican en la etapa de medir, pero también pueden usarse en otras etapas para apoyar la comprensión del proceso, puntos críticos y puntos de mejora.

En conjunto con los diagramas de flujo, los programas de dibujo estructural o diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés, Computer Assisted Design) son herramientas indispensables para visualizar y estudiar una estructura de un equipo, en dos y tres dimensiones. Con estos programas se puede agilizar el proceso de diseño, detectar errores, optimizar los recursos y crear mejoras en los procesos o diseños. Para este proyecto se usó la versión gratuita de prueba del software AutoCAD, que es muy conocida en el mundo ingenieril. Estas versiones de prueba se consiguen de forma sencilla en internet y normalmente permiten usar el programa de uno a dos meses sin cargos. Estos programas son muy importantes porque las estructuras se pueden hacer a escala, reduciendo el riesgo de errores en el cálculo de materiales. Además, se han vuelto tan comunes que existen en la web muchas

versiones compatibles entre sí y muchos tutoriales y cursos que muestran cómo se utilizan las diferentes herramientas de los programas, de modo que, lo que antes era un campo exclusivo de arquitectos o ingenieros civiles, se ha vuelto de dominio general, lo que los hace versátiles y fáciles de usar. (Quispe, 2024)

2.2.3 Analizar

La fase de Analizar busca determinar las causas raíz de los problemas identificados. Para ello en este proyecto se utilizan dos técnicas ampliamente conocidas, el diagrama de Ishikawa y la técnica de los cinco porqués.

El Diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de espina de pescado, es una herramienta gráfica esencial para identificar y categorizar las posibles causas raíz de un problema en procesos industriales. Desde la óptica del ingeniero industrial, esta técnica permite darle estructura al análisis en categorías ya definidas como Métodos, Mano de obra, Materiales, Maquinaria, Medio ambiente y Medidas (6M). (Ishikawa, 1986)

La técnica de Los cinco Porqués es una herramienta sencilla pero poderosa para llegar a la causa raíz de un problema mediante preguntas consecutivas de "¿por qué?". La aplicación de esta técnica es sencilla y de muy bajo costo de implementación, especialmente útil en entornos de producción donde los problemas recurrentes requieren soluciones duraderas. Por ejemplo, si un equipo de ensamblaje presenta retrasos constantemente, la aplicación de esta herramienta podría revelar que la causa final no es la falta de personal (respuesta superficial), sino una capacitación inadecuada en el manejo de un nuevo software de planificación.

Ahora, la efectividad de esta herramienta depende de la profundidad del análisis y del conocimiento técnico del equipo. En la industria automotriz, Toyota la integra los cinco Porqués con el PDCA (Plan-Do-Check-Act) para asegurar que las soluciones implementadas aborden verdaderamente el origen del problema. Un error común es detenerse antes de llegar al quinto "por qué", lo que lleva a soluciones parche o momentáneas en lugar de solucionar la verdadera causa raíz. (Ohno, 1988)

2.2.4 Mejorar

La fase de Mejorar se centra en el diseño e implementación de soluciones basadas en los hallazgos de las etapas anteriores. Esto podría implicar la optimización de procesos de operación, introducción de tecnologías avanzadas, mejoras en la formación del personal o en los procesos de gestión integral.

La herramienta más versátil en esta etapa es la lluvia de ideas. Esta técnica es colaborativa y permite generar soluciones creativas a los problemas que se analizaron en la etapa anterior. Para maximizar su eficacia, es muy importante seguir reglas como no criticar ideas durante la fase de generación de ideas y fomentar la participación equitativa. En la práctica industrial, esta técnica se vincula con el "Design Thinking" cuando se buscan innovaciones disruptivas, como rediseñar procesos logísticos para reducir huella de carbono. (Paulus & Kenworthy, 2019)

2.2.5 Controlar

La última fase, Controlar, establece un sistema de monitoreo para asegurar que las mejoras se mantengan y se ajusten según sea necesario, garantizando así la sostenibilidad de los beneficios alcanzados. (Pongboonchai-Empl, Antony, Garza, Komkowski, & Tortorella, 2024)

Así como los diagramas de flujo permiten una visualización sencilla del proceso, el diagrama de Gantt es una herramienta que permite visualizar tareas, tiempos y responsables de un proyecto. En este tipo de diagramas, la duración de cada tarea se visualiza como una barra horizontal, y también es posible ligar una tarea de otra, y generar dependencias entre actividades. Para elaborar un diagrama de Gantt que sea realmente útil para darle seguimiento a un proyecto, primero se debe puntualizar de forma detallada cada actividad, organizarla en orden cronológico las que son dependientes de la anterior, aproximar la duración de cada tarea y asignar los responsables de cada actividad. Además de determinar la duración, una vez que se establezca la fecha del proyecto, se deben fijar el inicio y final de cada actividad, de esa forma se puede dar seguimiento y control a las asignaciones y estimar la finalización del proyecto. (González, 2024)

Otra forma de controlar y dar seguimiento a los resultados del proyecto es teniendo métricas como los KPIs. Los KPIs (Key Performance Indicators) son métricas cuantificables que permiten monitorear la eficacia de las mejoras implementadas. Para un ingeniero industrial, seleccionar los KPIs adecuados es crítico: deben ser SMART (Específicos, Medibles, Alcanzables, Relevantes y con Tiempo definido. En manufactura, ejemplos clásicos incluyen el OEE (Eficiencia General de los Equipos), el Takt Time (tiempo disponible vs demanda) o el First Pass Yield (porcentaje de unidades producidas correctamente en la primera pasada). Estos indicadores no solo miden resultados, sino que también dan alertas sobre posibles desviaciones en tiempo real mediante presentación de datos digitales. (Kaplan & Norton, 1996)

2.3 MARCO CONCEPTUAL REFERENTE AL IMPACTO DEL PROYECTO

2.3.1 Productividad

El término productividad se refiere a la eficiencia con la que se utilizan los recursos en un proceso productivo, tales como la mano de obra, el capital y los materiales, para generar bienes y servicios. La productividad es un indicador clave del rendimiento de una empresa y se mide generalmente como la relación entre la producción total y los insumos utilizados en el proceso de producción. Aumentar la productividad permite a las empresas producir más con los mismos recursos, lo que resulta en una reducción de costos y una mejora en la competitividad en el mercado. La productividad también está ligada a la calidad del producto, ya que procesos más eficientes tienden a generar productos de mayor calidad con menos desperdicio. (Morris, 2020)

Como se indicó en párrafos anteriores, uno de los indicadores que se utiliza para medir la productividad es el OEE, Overall Equipment Effectiveness, por sus siglas en inglés. Este indicador representa el porcentaje de tiempo disponible del equipo, el tiempo efectivo en producción y que el producto siempre cumpla con las especificaciones de calidad. (Vorne Industries, 2024)

La implementación de tecnologías avanzadas y enfoques de mejora continua, como Lean Manufacturing y Six Sigma, ha sido fundamental para aumentar la productividad en la industria. Estas metodologías ayudan a identificar y eliminar desperdicios en el proceso de producción, optimizando el flujo de trabajo y minimizando los tiempos de espera. La automatización y el uso de tecnologías digitales, como el Internet de las

Cosas (IoT), también han aportado herramientas valiosas para monitorizar en tiempo real el rendimiento de las instalaciones, permitiendo una respuesta rápida a cualquier desviación en la productividad esperada. Estos avances no solo mejoran la eficiencia, sino que también permiten una adaptación más ágil a las demandas del mercado. (Pongboonchai-Empl, Antony, Garza, Komkowski, & Tortorella, 2024)

También la capacitación y el desarrollo de habilidades de los trabajadores desempeñan un papel crítico en la productividad industrial. Invertir en la formación continua del personal no solo mejora la competencia técnica, sino que también aumenta la moral y el compromiso de los empleados, lo que se traduce en un ambiente de trabajo más positivo y colaborativo. A medida que los empleados se vuelven más hábiles y están mejor preparados para enfrentar los desafíos, se fortalece la capacidad de la empresa para innovar y optimizar procesos, lo que, en última instancia, resulta en una mayor productividad y un mejor rendimiento general en el competitivo entorno industrial. (Ulloa, Sánchez, & Balcazar, 2023)

2.3.2 Evaluación de viabilidad económica

Otro aspecto relevante cuando se quieren implementar cambios en los procesos es la evaluación financiera. Este estudio exige la aplicación de herramientas rigurosas para determinar la viabilidad económica. El Valor Actual Neto (VAN) resalta como una métrica fundamental, al calcular el valor presente de los flujos de caja futuros, descontados a una tasa que refleja el costo de oportunidad del capital que se invierte en el proyecto. (Brealey, Myers, & Allen, 2020)

Este indicador no solo cuantifica la rentabilidad, sino que también permite comparar entre varias alternativas de inversión. Un proyecto con VAN positivo indica que genera valor económico neto, superando las expectativas mínimas de rentabilidad. Sin embargo, su interpretación requiere considerar variables críticas como la estimación precisa de los flujos de caja y la selección de una tasa de descuento adecuada, aspectos que en entornos industriales pueden verse afectados por la variabilidad de los costos de insumos, entre otros aspectos. (Ross, Westerfield, & Jaffe, 2022)

La Tasa Interna de Retorno (TIR), por su parte, da una perspectiva complementaria al expresar la rentabilidad del proyecto como un porcentaje anual. Es muy aplicado en la práctica profesional debido a su facilidad de interpretación: una TIR superior al costo de capital sugiere que el proyecto es financieramente atractivo. (Gitman & Zutter, 2015)

Sin embargo, esta variable presenta limitaciones en escenarios complejos, como situaciones donde se dan flujos de caja no convencionales o muy variables, algunos meses positivos y otros negativos, donde puede generar conclusiones ambiguas. En contextos industriales, esto es particularmente relevante al evaluar iniciativas con etapas de reinversión significativas, como la modernización de plantas de producción. (Damoradan, 2016)

En aplicaciones prácticas, como la evaluación de proyectos de mejora continua en manufactura, la combinación de VAN y TIR provee una visión más robusta. Por ejemplo, al implementar metodologías Lean Six Sigma, estos indicadores permiten cuantificar no solo los ahorros operativos directos, sino también el impacto estratégico de reducir tiempos de ciclo o mejorar la calidad. Tomando en cuenta estos dos aspectos de medición financiera y de alineamiento con objetivos operacionales, se explica por qué estas herramientas siguen siendo pilares en la formulación de

proyectos industriales, desde pequeñas optimizaciones hasta grandes expansiones de capacidad. (Brigham & Ehrhardt, 2022)

2.4 ANTECEDENTES DE PROYECTOS O EXPERIENCIAS SEMEJANTES

Se han encontrado varios artículos y proyectos con temáticas similares, enfocadas en mejoras de productividad y propuestas de planes de mantenimiento en diversas industrias. Se recopilaron 10 proyectos, de los cuales cuatro son extranjeros y los otros seis son desarrollados por estudiantes de la Universidad Hispanoamericana entre los años 2014 y 2022.

En el año 2014, en Colombia, Rafael Ángel y Héctor Olaya diseñaron un plan de mantenimiento preventivo para la empresa Agroángel. El desarrollo implicó la elaboración de instructivos para diferentes actividades de mantenimiento con el fin de reducir los paros no programados y aumentar la efectividad de la empresa. El estudio se basó en el cronograma de las actividades y la elaboración de instructivos solamente, no se realizó ningún estudio de beneficio-costos ni se incluyó implementación o seguimiento al proyecto. (Angel Gasca, R. & Olaya Vargas, H., 2014)

El estudiante Elvis Cansino, en 2015, en Quito, Ecuador, propone la elaboración de un plan de mantenimiento preventivo y seguridad industrial para la fábrica Minerosa. Él concluyó que la aplicación del plan preventivo permitiría garantizar la prolongación de la vida útil de las máquinas, manteniendo un stock adecuado de repuestos acorde a las necesidades de los equipos. Esto también evita que haya paros de las máquinas por el tiempo de recibo de las refacciones. Este estudio no evalúa la viabilidad

económica ni se le da seguimiento a la implementación de la propuesta. (Cansino Flores, 2015)

En 2016, en Lima, Perú, el estudiante Édgar García presentó un proyecto de implementación de un plan de mantenimiento preventivo en función de la cantidad de los equipos del proceso productivo para mejorar la disponibilidad de la empresa Uesfalia Alimentos S.A. Allí se propuso la sistematización del plan de mantenimiento usando la herramienta Excel y generando órdenes de trabajo, que inicialmente no estaban implementadas en la empresa. Esto se incluyó en el sistema de gestión de calidad de la empresa y se logró la reducción del número de intervenciones por fallas y aumentó las horas operativas de los equipos pasando de 54,6 horas de tiempo entre fallas, a 62.2 horas. (García Mallqui, 2016)

Un año después, también en Lima, Alí Villena genera una propuesta de implementación de un plan de mantenimiento de equipos bajo técnicas del TPM en una empresa constructora. Este plan de mantenimiento permitiría mejorar la disponibilidad y rendimiento de la maquinaria, terminando los proyectos en los plazos establecidos. La evaluación de la relación beneficio-costó indicó un 1.25, por lo que es un proyecto económicamente viable y se logró también aumentar en un 35% la disponibilidad de la maquinaria de la empresa. (Villena Andia, 2017)

Este mismo año se desarrollaron dos proyectos en Costa Rica, por parte de estudiantes de la Universidad Hispanoamericana. La estudiante Susan Méndez desarrolló un proyecto de aumento en la productividad del proceso de fabricación de Hydrox S en Industriales Austin Costa Rica. La implementación del proyecto fue exitosa y logró un aumento del 33% en la producción de Hydrox S en su fase oxidante y de un 15% en su fase aceitosa. También, las acciones derivaron en un ahorro de

\$855 por cisterna de producto terminado. Esto fue posible mediante la creación y aplicación de nuevos registros al proceso, capacitaciones de personal, reordenamiento de funciones y aumento en la capacidad de almacenamiento. (Méndez Cruz, 2017)

Por otro lado, durante ese mismo año, pero en la industria automotriz, José Luis Acuña desarrolla un proyecto de mejoramiento de la productividad y cumplimiento de la programación de entregas de vehículos en la planta Romero Fournier en Costa Rica. Él plantea un sistema que da seguimiento a los vehículos durante todo el proceso, para lo cual se requieren equipos de cómputo y varios puntos de conexión a internet con el fin de mantener la información actualizada. La evaluación económica arrojó un valor actual neto seis veces mayor a la inversión, lo que indica la viabilidad de la implementación del proyecto. (Acuña Araya, J. & Campos Ureña, L., 2017)

El diseño de un plan de administración del mantenimiento para Oberg Medical fue propuesto por Richard Mejía en el año 2018. Su proyecto se basó en analizar las causas que afectaban los equipos y que generaban fallos por mantenimiento. Para dar solución a la problemática, se crearon procedimientos e instructivos que abordaban integralmente los equipos desde su instalación y operación, incluyendo la atención de fallas. El autor indica que, de implementarse el plan en su totalidad, la empresa podría ahorrar entre \$26000 y \$56000 dólares por año. El estudio no le da seguimiento a la implementación del proyecto. (Mejía Carvajal, 2018)

José Montenegro, en el año 2020, presenta una propuesta de un plan de mantenimiento de los equipos de refrigeración de los cuartos fríos en las bodegas de la Caja Costarricense de Seguro Social ubicadas en La Uruca. Él crea un manual de procedimientos para las actividades de mantenimiento y coordina una capacitación al personal con el Instituto Nacional de Aprendizaje, referente al mantenimiento de

sistemas de enfriamiento. Al evaluar la viabilidad de la propuesta, se encuentra que aplicarla en un 100% no es viable, pero aplicarla al 50% de los equipos resulta una viabilidad positiva. El estudio no le da seguimiento a la implementación del proyecto. (Montenegro Rosales, 2020)

Siguiendo con las propuestas de planes de mantenimiento, Jerry Rocha, en 2021, diseña un plan de mantenimiento preventivo para las máquinas del área de empaque de Sigma Alimentos Costa Rica. Él analizó los efectos de la falta de mantenimiento en el área, donde encontró que hubo 213 horas de paro entre setiembre de 2020 y mayo de 2021. La propuesta incluye instructivos y formularios de mantenimiento para 8 máquinas del área y recomienda aplicar y evaluar los resultados luego de 4 meses de la implementación. (Rocha Corea, 2021)

Finalmente, en 2022, María José Espinoza, propone una mejora de procesos productivos utilizando herramientas de distribución de planta y diseño de métodos en la PYME Recomendares del Pacífico. Mediante una lluvia de ideas con los colaboradores de la empresa, se logró identificar ocho problemas, de los cuales, cuatro son causas principales de la baja productividad y ventas. Se encontró que no hay suficientes neveras para el almacenaje de los mariscos, que la distribución del espacio no es adecuada, que los colaboradores no tienen conocimientos en mejora continua y no están capacitados en manejo adecuado de los productos. La propuesta incluye una nueva distribución del espacio, programas de capacitación en las áreas requeridas y señalización efectiva de las neveras. La evaluación beneficio-costó arrojó un valor de 2,4, lo que implica que el proyecto es económicamente viable. Además, se calcula que la implementación de la propuesta podría impactar las ventas aumentándolas hasta en un 140%. (Espinoza Vasquez, 2022)

La mayoría de los proyectos presentados están relacionados a diseños o implementaciones de planes de mantenimiento, o aumentos de la productividad en diferentes tipos de industrias, sin embargo, ninguna de estas propuestas es similar en desarrollo ni en abordaje a la propuesta que se presenta en este proyecto.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1 METODOLOGÍA PARA LA DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Tabla 2 Resumen de la metodología para la definición del problema

Objetivo específico	Actividades	Herramientas	Descripción	Plazos	Responsables
Recolectar y analizar los datos sobre el proceso de mantenimiento actual mediante la revisión de bitácoras de producción.	Revisión de bitácoras de producción. Elaboración de base de datos a partir de las bitácoras. Análisis estadístico básico para la línea base.	Observación. Aplicación de análisis estadístico básico. Gráfico de Pareto.	Se revisaron las bitácoras de producción para determinar las principales causas de paro y los tiempos respectivos. Con estadística básica se determinaron los datos para elaborar el gráfico de Pareto.	4 semanas.	Supervisor de producción.

Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente, para la definición del problema se realizó una observación directa del proceso durante varios meses, desde que inició la operación normal, en el mes de enero y hasta el mes de julio. Esta observación se realizó desarrollando las actividades normales del puesto de supervisor de producción. La observación directa permitió determinar cuáles eran los principales problemas y situaciones que generaban paros en el proceso productivo. También, se observó la forma en que se abordaban las diferentes situaciones, responsables, equipos y procedimientos para solucionar los problemas. Gracias a estas observaciones se obtuvo información sobre las posibles causas de los paros, las cuales se expondrán y analizarán en el capítulo de línea base de este proyecto.

Aunado a la observación directa, y en forma de respaldo documentado, se revisó la bitácora de producción donde se registraban todos los paros del proceso productivo, el tiempo de paro y la causa que generaba cada paro. Con esta información se construyó una base de datos, la tabla extendida se encuentra en el Apéndice 1, y de allí se deriva un resumen, que se muestra en la tabla 1, que indica la fecha, el tipo de falla que originó el paro, el tiempo, y la causa del paro, iniciando el 1 de enero, hasta el 31 de julio del 2024.

Con los datos de la tabla mencionada anteriormente, y utilizando la herramienta Excel de Microsoft Office, se elaboró un gráfico de Pareto inicial, mostrado en la figura 3, donde se determinó que el principal problema de paro en el proceso productivo eran altos o bajos inventarios, lo cual es una problemática relacionada con la logística de la colocación de algunos productos terminados (asfalto) o con la falta de materia prima (aceite usado) para mantener el proceso en forma continua. De modo que se sacó este problema del análisis y se hizo un segundo gráfico de Pareto. De manera sucesiva, se observó que la segunda causa de paro ya se había reparado, por lo que se elimina de la lista y se hace un tercer diagrama de Pareto. Esta sucesión de gráficos permitió determinar que hay una problemática en el mantenimiento de la máquina, que ocasiona paros no programados que golpean fuertemente la productividad del proceso.

3.2 METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN Y RESPALDO CUALITATIVO DEL PROYECTO

Tabla 3 Resumen de la metodología para la medición y respaldo cualitativo del proyecto

Objetivo específico	Actividades	Herramientas	Descripción	Plazos	Responsables
Recolectar y analizar los datos sobre el proceso de mantenimiento actual mediante la revisión de bitácoras de producción.	Revisión de bitácoras de producción. Elaboración de base de datos a partir de las bitácoras. Análisis estadístico básico y cálculo de variables para la línea base.	Aplicación de análisis estadístico básico. Gráfico de Pareto. Estimaciones económicas. Los cinco porqués. Diagrama de Ishikawa	Se aproximaron las pérdidas económicas relacionadas al tiempo no disponible del equipo. Se calculó el OEE inicial como línea base para el proyecto. Se aplicó la técnica de los 5 porqués, y luego un diagrama de Ishikawa para determinar la causa raíz del problema.	4 semanas	Supervisor de producción.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Metodología para la medición

Inicialmente, para la recopilación de datos que respaldan el proyecto se realizó una revisión de la bitácora del proceso, que contenía el registro histórico de los paros a partir de enero de 2024, y hasta el mes de agosto del mismo año. Este registro tiene una descripción del tiempo y la causa de los paros del equipo en estudio. A partir de

esta bitácora se extrajeron los datos que justifican la propuesta del proyecto. La base de datos se elaboró utilizando Excel de Microsoft Office.

Para los datos financieros, se solicitó al equipo de ventas los costos de producto terminado en unidades de dólares por litro (\$/L), y se calculó la cantidad de producto que se dejó de producir durante los tiempos en paro, tomando en cuenta el flujo normal del equipo (FNE) en Litros por hora. A continuación, se indica la fórmula aplicada para determinar las pérdidas económicas (PE) derivadas de los tiempos en paro.

$$PE = FNE \text{ (L/hora)} \times \text{Horas en paro (hora)} \times \text{costo del producto (\$/L)} \quad (3.1)$$

Para calcular la productividad en términos del indicador OEE, se requieren varias variables, entre ellas la disponibilidad del equipo (DE), que se calcula de la siguiente forma:

$$DE = \text{Horas productivas} / \text{Horas totales disponibles} \quad (3.2)$$

También se requiere el valor del rendimiento del equipo (RE), el cual se calcula según la fórmula 3.3.

$$RE = \frac{\text{Flujo alimentación de materia prima promedio}}{\text{Flujo de alimentación según fabricante}} \quad (3.3)$$

El tercer factor que compone el OEE es la calidad. Para determinar la calidad, se divide la cantidad de litros rechazados por no cumplir requerimientos de calidad, entre la cantidad de litros totales producidos.

$$\text{Calidad} = \text{Litros de producto rechazados} / \text{Litros totales producidos} \quad (3.4)$$

A partir de las variables anteriores, el OEE se calcula de la siguiente forma:

$$OEE = DE \times RE \times \text{Calidad} \quad (3.5)$$

3.2.2 Metodología para el análisis

Como se indicó en la sección anterior, para el análisis de datos iniciales se utilizó el gráfico de Pareto, el cual se aplicó tres veces de forma sucesiva, descartando los problemas que no podían ser atendidos desde la parte mecánica, o que, en el momento de presentar la propuesta, ya habían sido solucionados.

También, para el análisis de causa raíz del problema a tratar, se utilizó un diagrama de flujo, para ubicar la sección donde se daban los atascamientos, y luego, mediante la técnica de los cinco porqués, se determinó la razón de la generación del atascamiento en los componentes del Front End Vacuum System.

El Diagrama de Ishikawa también se utilizó para complementar el análisis de la causa raíz, y el aporte de diferentes factores generadores del problema de atascamiento sistema.

3.3 METODOLOGÍA PARA LA PROPUESTA DE MEJORA, CONSTRUCCIÓN O PUESTA EN PRÁCTICA DE UN NUEVO PROCESO, PRODUCTO O SERVICIO

Tabla 4 Resumen de la metodología para la propuesta de mejora

Objetivo específico	Actividades	Herramientas	Descripción	Plazos	Responsables
Elaborar una propuesta de mejora para el proceso de mantenimiento basada en los requerimientos de los equipos, con el fin de disminuir los paros no programados relativos a procesos de mantenimiento.	Revisión de análisis de datos. Estudio de la configuración inicial del equipo. Elaboración de la propuesta. Programación de actividades.	Diagramas de flujo. AutoCAD. Diagrama de Gantt.	Con el conocimiento de la causa raíz se elaboró una propuesta con dos posibles soluciones, se solicitó el visto bueno de la jefatura y se programó la puesta en marcha de las mismas.	8 semanas	Supervisor de producción

Fuente: Elaboración propia.

El diagrama de Gantt se utilizó para organizar las actividades del proyecto, desde el diseño de la propuesta hasta la implementación y seguimiento del mismo.

Una vez analizado el proceso mediante el mapeo, se procedió a revisar la configuración física del equipo y se propuso una alternativa sencilla, económica y fácil que permitiera la limpieza de los componentes principales sin necesidad de detener el proceso productivo.

Se analizaron los puntos donde se podía cambiar la configuración del equipo sin generar alteraciones al producto y también se determinó la lista de materiales que se requirieron para construir la línea alternativa o bypass que se utilizaría cuando se atascara la línea principal. Se tomaron fotografías para evidenciar la configuración inicial del equipo, y se trabajó en un boceto para la propuesta de mejora. El boceto se realizó en el programa de diseño asistido por computadora, AUTOCAD, en su versión gratuita de prueba.

Una vez analizada la factibilidad económica de la propuesta, se solicitó el visto bueno a las jefaturas, y se procedió con la construcción del bypass.

3.4 METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

Tabla 5 Resumen de la metodología para la implementación del proyecto

Objetivo específico	Actividades	Herramientas	Descripción	Plazos	Responsables
Evaluar el beneficio-costo del proyecto para determinar la viabilidad de la implementación de la propuesta.	Recolectar los datos requeridos. Realizar los cálculos del TIR y el VAN. Definir si el proyecto es económicamente viable.	Procesador de datos Microsoft Excel.	A partir de los datos de los costos por la implementación de cada propuesta de mejora y de las proyecciones de los ingresos, se calculó el TIR y el VAN.	2 semanas.	Supervisor de producción.
Implementar la propuesta de mejora y evaluar la efectividad del proyecto.	Visto bueno de jefatura. Compra y recepción de materiales. Programación de tareas.	Diagrama de Gantt. Diagramas de flujo.	Cuando se tiene el visto bueno, se inicia con la compra de materiales y confección del bypass.	1 semana.	Supervisor de producción. Técnico eléctrico. Técnico de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia.

El hecho de implementar o no una propuesta de mejora en una empresa radica en el beneficio económico que se tendrá a partir de una inversión. Es por esto que, para el abordaje del componente financiero se aplicó un análisis de beneficio-costos, mediante el cálculo del TIR y el VAN, tomando en cuenta los costos de la materia prima en dólares y las horas hombre en dólares por hora (\$/hora) utilizadas en la implementación de la propuesta de mejora. Estos costos representan la inversión inicial necesaria para la puesta en marcha de la propuesta. También se tomaron en cuenta los costos de mantenimiento mensuales proyectados mensualmente, por otro lado, para el cálculo del TIR y el VAN también se necesita una componente de

ingresos, que en este caso se tomaron en cuenta varias variables, primero, el promedio de tiempo perdido por mes debido a los paros no programados debidos a fallos en el Front End Vacuum System. Dado que este tipo de paros ya no se presentó más, se calculó la cantidad de VGO producido en ese tiempo promedio basado en el rendimiento normal del equipo que trabaja a 7,7 L/min. Con el total de VGO calculado y el precio del litro de producto, se calculó el ingreso mensual que representa la implementación de la mejora en el sistema.

La empresa cuenta con un sistema computarizado para generar órdenes de trabajo en el área de mantenimiento, por lo que el cálculo de la inversión inicial y el costo de los mantenimientos semanales se tomaron de las órdenes de trabajo.

Con estos datos anteriores se calcula la factibilidad económica de la propuesta.

También, como parte de la implementación, se incluyeron las actividades de construcción, etapa de pruebas y análisis de resultados en el diagrama de Gantt que permitió darle seguimiento al proyecto.

3.5 METODOLOGÍA PARA LA VERIFICACIÓN, ASEGURAMIENTO, CONTROL Y SEGUIMIENTO DE RESULTADOS

Tabla 6 Resumen de la metodología para la etapa de control y seguimiento

Objetivo específico	Actividades	Herramientas	Descripción	Plazos	Responsables
Implementar la propuesta de mejora y evaluar la efectividad del proyecto.	Recolección y revisión de datos. Cálculo y comparación de variables.	Bases de datos. Indicadores de productividad.	Se revisaron y compararon los paros ocurridos luego de la implementación de la mejora, y se calculó un nuevo OEE para compararlo con el inicial.	12 semanas.	Supervisor de producción.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de la etapa de pruebas, se revisó durante tres meses el comportamiento del bypass y se analizaron las bitácoras de tiempo productivo y tiempo perdido. De esta forma se verificó la efectividad de los cambios realizados, así como el control y seguimiento de resultados mediante la revisión diaria de las bitácoras de producción. También, a partir de los datos obtenidos de esta revisión, fue posible calcular el cambio en la productividad del equipo a partir del indicador OEE.

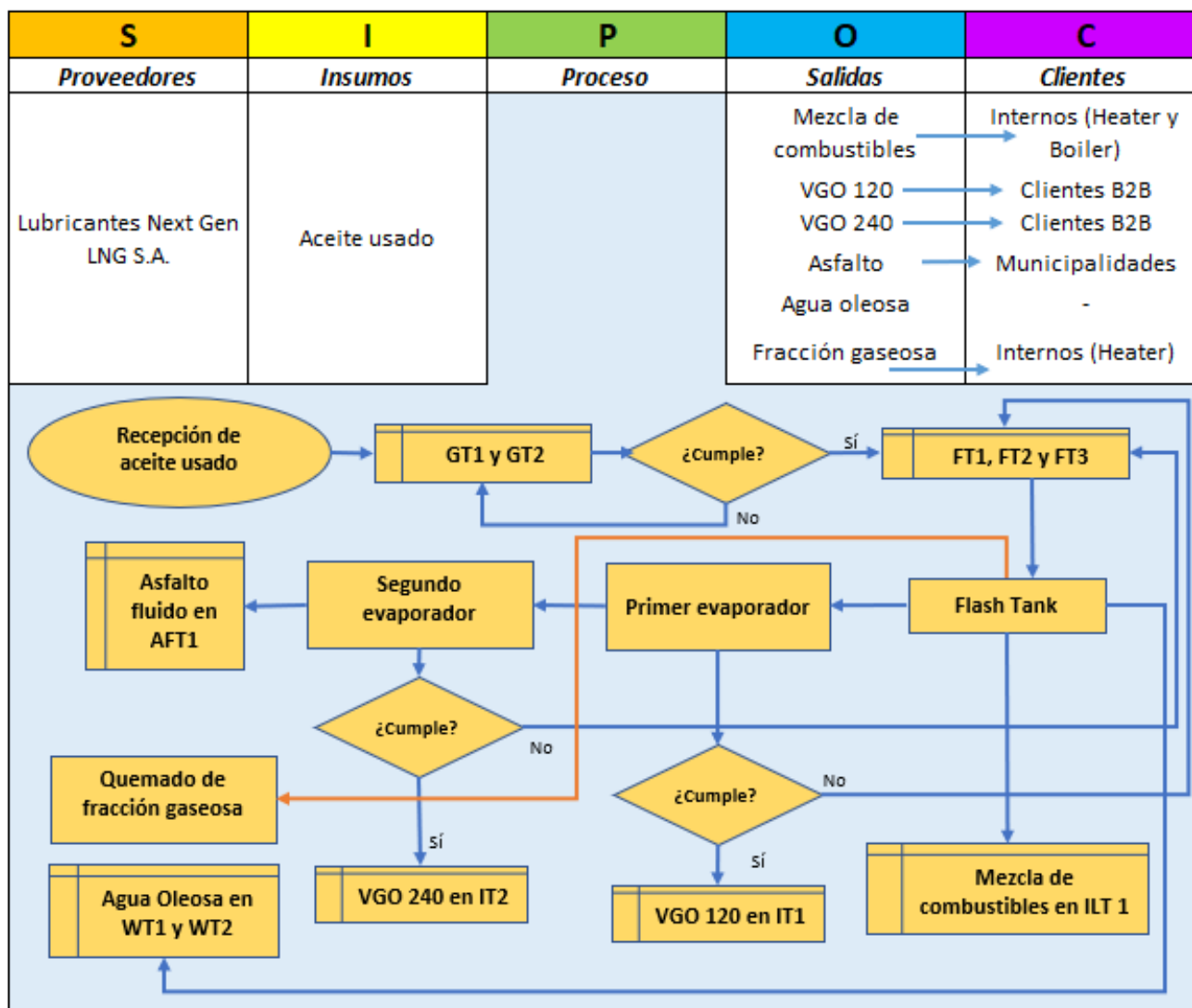
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE CAUSAS RAÍZ

El presente capítulo está enfocado en identificar las causas fundamentales que generan los paros no programados en el proceso productivo del módulo UORS en la planta de Metalub. Para este análisis se emplearon herramientas como el diagrama de Pareto, el diagrama de Ishikawa y el método de los 5 Porqués, con el fin de establecer las relaciones causa-efecto y profundizar en los problemas críticos.

4.1 DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROCESO

En la figura 4 se encuentra el diagrama SIPOC. Este diagrama permite identificar las entradas y las salidas del equipo que está siendo estudiado, analizado e intervenido en este proyecto. En este diagrama se observa que solamente se cuenta con un proveedor de materia prima, que es Lubricantes Next Gen S.A. (LNG) que es una empresa que también forma parte del corporativo al cual pertenece Metatecnología Motriz S.A. (MTM). El único ingreso al proceso es el aceite usado, también llamado aceite negro. A este aceite se le realizan pruebas de contenido de agua, cantidad de azufre y cantidad de cloro al llegar a la planta. Si los criterios de calidad se cumplen, el aceite usado se coloca en los tanques GT1 y GT2. Su nombre se debe a que son “Guard Tanks”, tanques donde, por diferencia de densidad, el agua que traiga la materia prima queda al fondo del tanque. Luego el aceite usado es trasladado a los tanques de alimentación (“Feed Tanks”) FT1, FT2 y FT3. El UORS recibe el aceite negro de los tanques de alimentación y entra al proceso de destilación a baja presión, del cual se obtienen seis subproductos, VGO 120, VGO 240, una mezcla de combustibles, una fracción de gases, asfalto fluido y un residuo final de agua oleosa.

Figura 4 Diagrama SIPOC para el UORS



Fuente: Elaboración propia.

El proceso de destilación tiene tres etapas. La primera se da en el “Flash Tank” donde se separan los componentes más livianos de la mezcla de aceite negro, la mezcla de combustibles, la fracción gaseosa y la mayor parte del agua. La mezcla liviana continúa hacia el primer evaporador, mientras que la mezcla de combustibles se traslada al tanque de almacenamiento de combustible para ser aprovechado por el mismo proceso alimentando al calentador y a la caldera. Por otra parte, el agua oleosa se

almacena en los tanques WT1 y WT2. La salida del Flash Tank que se resalta en color naranja es la de mayor interés, pues es la línea donde se generan los atascamientos que producen paros no programados en el equipo. Luego la mezcla pasa por un primer evaporador donde la temperatura es un poco más alta y se mantiene el alto vacío, por lo que es posible separar la fracción más liviana de VGO (VGO 120), que se envía al tanque IT1 (“Intermediate Tank”). Una vez separada esta fracción, la mezcla que queda pasa por un segundo evaporador donde se separa el VGO 240 del asfalto. El VGO se almacena en el IT2 y el asfalto en el AFT1.

4.2 ANÁLISIS DE LOS DATOS RECOLECTADOS

A partir del análisis de la bitácora de producción, facilitada por la gerencia general, se identificaron los principales problemas que causaron paros en el módulo UORS.

En el capítulo I se encuentra el resumen de los paros no programados y la figura 3 permite visualizar que hay dos problemas principales que abarcan el 93% de los paros, que son los altos inventarios y el fallo en la bomba del heater.

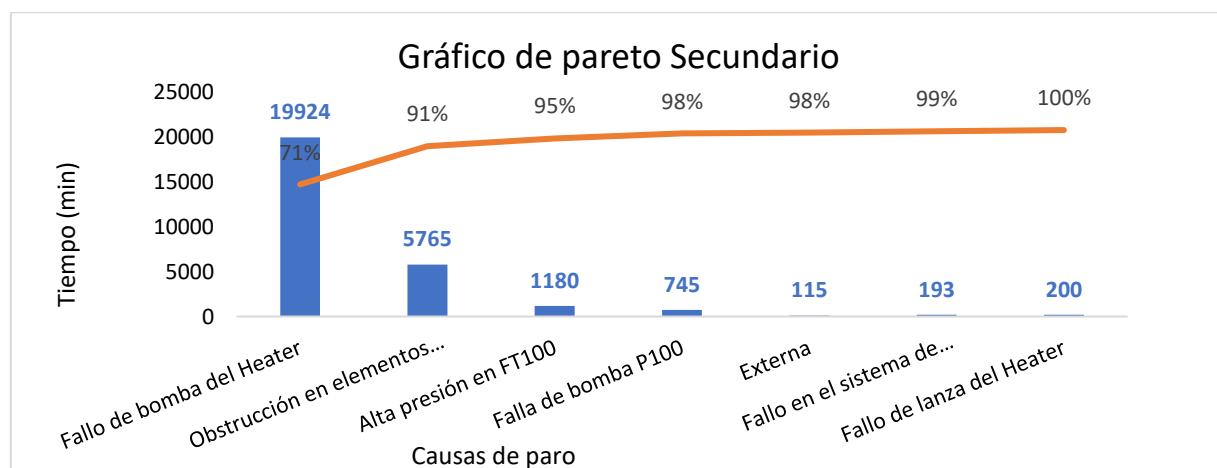
Sin embargo, como se aclaró también en páginas anteriores, los altos inventarios no los maneja la empresa directamente, si no que se encarga LNG, por lo que no se va a abordar su posible solución en este proyecto.

Para continuar con el análisis, se sacó esa primera causa de la lista y se elaboró un segundo gráfico de Pareto con las causas de paro restantes. La figura 5 muestra los resultados.

Este nuevo diagrama indica que hay dos causas principales que representan el 91% de los paros, correspondientes a la falla de la bomba del heater y a la obstrucción de

los elementos del Front End Vacuum System. Dado que la bomba del heater causó tantos paros en un periodo muy corto de tiempo, la administración tomó la decisión de cambiar la bomba por una de mayor capacidad. Este cambio se realizó el 27 de junio, y como se puede observar en la tabla del Apéndice 1, esta bomba ha fallado solamente dos veces más en el mes de julio, pero los paros que causa son de máximo 35 minutos. Esta es la razón por la que tampoco aborda este problema dentro del alcance del proyecto.

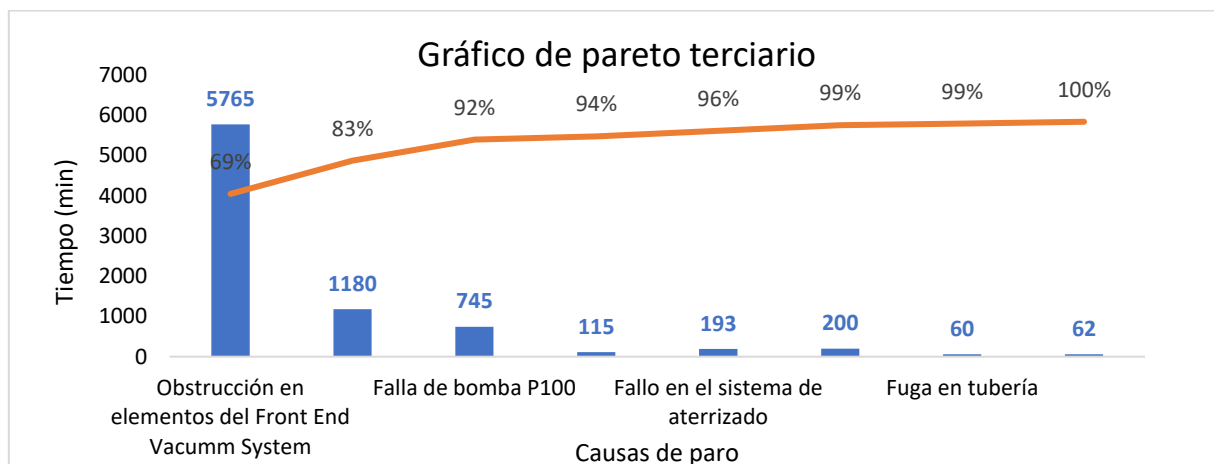
Figura 5 Diagrama de Pareto secundario



Fuente: Elaboración propia.

Cuando el fallo en la bomba del heater se saca también de la lista, aparece la obstrucción de los elementos del Front End Vacuum System como la principal causa de paros, con casi un 69% del tiempo de paro. Esta información se puede observar en la figura 6. Cuando se presenta esta obstrucción, se debe detener el proceso para limpiar y revisar toda esa sección del sistema.

Figura 6 Diagrama de Pareto terciario



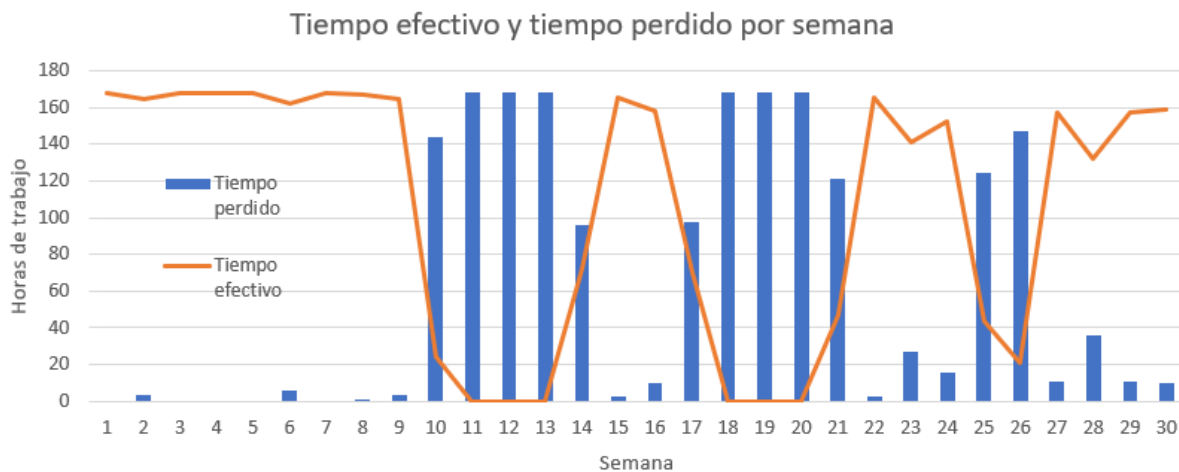
Fuente: Elaboración propia.

La causa mayoritaria de paros son las obstrucciones en los elementos del Front End Vacuum System, y la siguiente causa es la fuga en la línea de combustible, la cual fue reparada el mismo día que se encontró el problema. En conjunto, ambas representan un 83% del tiempo en paro.

Todos estos paros provocan que la planta no trabaje a su máxima capacidad, generando baja productividad, como se observa en la figura 7, donde se muestra el tiempo perdido y el tiempo efectivo de trabajo.

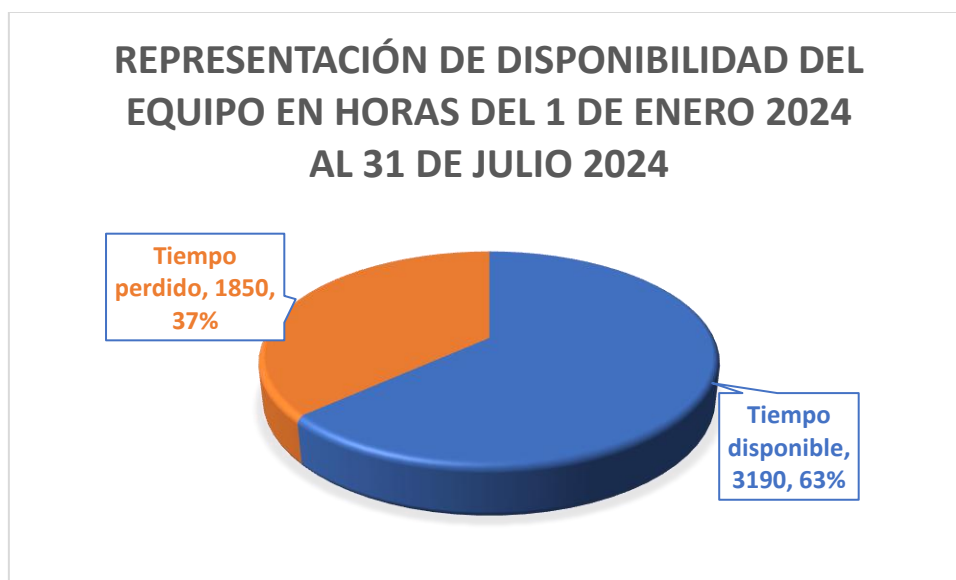
El tiempo disponible semanalmente es de 168 horas efectivas. La línea color naranja en la figura 7 representa el tiempo productivo y las barras en azul representan el tiempo perdido. Las semanas 11, 12, 13, 18, 19 y 20 tienen productividad nula por una situación de inventarios, bajos en materia prima y altos en producto terminado. Las semanas 14, 17, 21, 25 y 26 tienen baja productividad y alto tiempo perdido debido a causas de mantenimiento, como se observa en el Apéndice 1.

Figura 7 Gráfica de tiempo efectivo y tiempo perdido



Fuente: Elaboración propia

Figura 8 Disponibilidad general del equipo



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 8 se muestra la disponibilidad del equipo en general durante los primeros 7 meses del año.

La eficiencia de la planta se ha visto afectada por la cantidad de paros sucedidos en los primeros siete meses del año. Los paros relacionados a mantenimientos correctivos suman 37, de un total de 45 paros, representando un 82% del total de las causas de paro con respecto a la frecuencia.

La productividad del proceso se mide con el indicador OEE, que toma en cuenta la disponibilidad del equipo, el rendimiento del equipo, y la calidad del producto terminado.

La disponibilidad del equipo se puede calcular, ya que se conoce el tiempo útil dado por el fabricante, y el tiempo productivo logrado. El rendimiento se determina a partir del flujo de alimentación al sistema y la calidad se demuestra a través de los gráficos de control que lleva el proceso.

Para el periodo del 1 de enero al 31 de julio del año 2024, la disponibilidad del equipo fue de un 63,3%, transformándose en un factor de 0.633. Luego, para calcular el rendimiento, el fabricante indica que el mayor flujo de ingreso de materia prima debe ser de 15 L/min, y el sistema durante el periodo en estudio, se mantuvo en promedio a 11 L/min, dando como resultado un rendimiento de 73% y convirtiéndose este factor en 0.73.

Por último, la calidad del producto sí se asegura al 100%, convirtiéndose en un factor de 1. Es importante aclarar que las primeras tres horas del proceso, cuando se arranca la máquina, se debe mandar todo el producto a reproceso hasta que se alcancen las condiciones óptimas de operación. Una vez alcanzadas estas condiciones, cuando el producto cumple con el plan de calidad, se envía a los tanques de producto intermedio para seguir el proceso. Los gráficos de control que se encuentran en el Anexo 2,

demuestran que la calidad siempre se ha mantenido dentro de los parámetros de control.

Con los factores calculados, se determina que el indicador OEE entre los meses de enero y julio fue de 0,462, o sea del 46,2%, por debajo del 50% de productividad. A pesar de que se sabe que es un valor bastante bajo para un proceso productivo, se debe tomar en cuenta que la empresa está en su etapa de start up, iniciando operaciones, y aplicando tecnologías muy novedosas a nivel mundial, por lo que la adaptación, el aprendizaje, y sobre todo la mejora continua son parte de la operación.

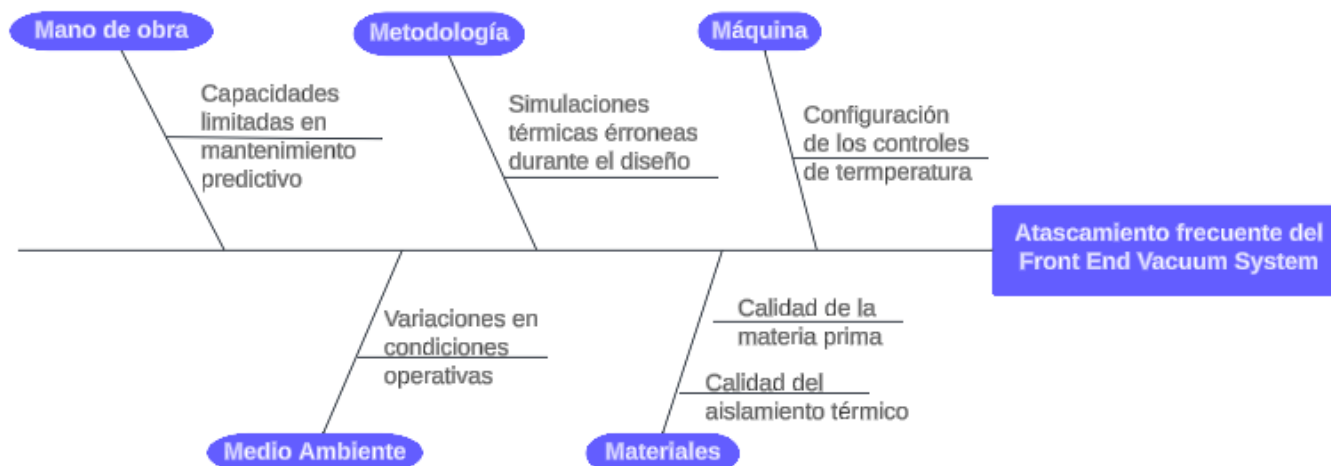
4.3 DIAGRAMA DE CAUSA-EFECTO ISHIKAWA

Para esta etapa de análisis y búsqueda de las causas raíz se decide utilizar el diagrama de Ishikawa. Esta técnica facilita la organización y visualización de las posibles causas del problema principal. Para la elaboración de este diagrama se involucró a un equipo de trabajo conformado por el gerente general, la gerente de calidad y producto, el supervisor senior de producción, los cuatro supervisores junior, el técnico en mantenimiento y el técnico eléctrico.

En la figura 9 se presenta el diagrama, donde las categorías principales incluyen:

- Materiales: Calidad del aislamiento térmico y calidad de la materia prima.
- Máquinas: Configuración de los controles de temperatura.
- Metodología: Simulaciones térmicas erróneas durante el diseño.
- Medio ambiente: Variaciones en las condiciones operativas.
- Mano de obra: Capacidades limitadas en mantenimiento predictivo.

Figura 9 Diagrama de Ishikawa para identificación de causas raíz



Fuente: Elaboración propia.

Los materiales, tanto de ingreso al proceso como los materiales de recubrimiento térmico de las tuberías son factores muy importantes. La materia prima de este proceso es una mezcla de aceites lubricantes usados. La gran mayoría de proveedores han sido capacitados para que el aceite recolectado venga sin sólidos, sin anticongelante y que no se mezclen otros productos incompatibles con el aceite, como el agua, aunque el proceso permita un límite máximo de hasta 10% en el aceite usado. Los puntos de recolección son muy variados, por lo que la composición del aceite usado varía constantemente. El sistema es lo bastante robusto para aceptar variaciones, pero en algunas ocasiones se recibe aceite con un mayor porcentaje de partículas y de compuestos cerosos que pueden condensarse con mayor facilidad en la tubería, causando atascamientos. Esta condensación también puede deberse a la mala calidad o falta de material aislante de la tubería. Al no tener el suficiente recubrimiento térmico, la tubería intercambia calor con el ambiente, provocando que

las temperaturas dentro del sistema bajen, causando condensaciones y, por ende, atascamientos de las tuberías.

La máquina tiene algunos controles y sensores de temperatura automatizados, en el área de los evaporadores, sin embargo, a lo largo de la tubería, en algunas secciones, solamente hay calentadores que mantienen la tubería caliente y la única forma de controlar la temperatura es medirla con termómetros infrarrojos, provocando que las mediciones no sean tan precisas.

La metodología aplicada cuando se diseñó la planta quizá no fue del todo correcta, es posible que no se hayan hecho las simulaciones adecuadas para modelar las variaciones de temperatura que se pudiesen presentar durante la operación. Estas variaciones, dependiendo de los componentes que contenga del aceite usado pueden ser más sensibles a la condensación en la tubería con pequeñas disminuciones en la temperatura.

El medio ambiente no juega un papel tan preponderante ni significativo en las condiciones operativas del equipo, sin embargo, si el aceite usado contiene componentes sensibles a las disminuciones de temperatura, un día lluvioso y fresco las tuberías se verían más afectadas, generando condensación y obstrucciones en el flujo.

La mano de obra es crucial en el proceso. Al ser una tecnología muy novedosa, el conocimiento del equipo es limitado, así como los requerimientos de mantenimiento que necesita. Cuando se dio la instalación del equipo, hubo varias semanas de capacitación con un equipo de expertos de Estados Unidos de América y de la India. Esta capacitación se dio en inglés, por lo que la mayoría del personal operativo fue capacitado luego por los supervisores que lograron entender las indicaciones de los

extranjeros. Esto provoca que el aprendizaje sea un poco más lento, y que cada hallazgo sea un desafío a la hora de solucionar problemas.

De todas las causas detalladas anteriormente, el equipo concuerda que el factor de la máquina, los materiales y la mano de obra son los que toman más relevancia, y abordarlos de diferentes maneras podría impactar positivamente la eficiencia del proceso.

4.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS 5 PORQUÉS

Los resultados del trabajo en equipo aplicado para la determinación del diagrama de Ishikawa fueron tan satisfactorios que se decidió volver a reunir al equipo para ejecutar la dinámica de los cinco Porqués. Esta herramienta se vale del conocimiento técnico profundo del equipo para ahondar en la problemática y determinar la principal causa raíz del problema de obstrucciones en el Front End Vacuum System. Para aplicar esta herramienta se contó con el mismo grupo de colaboradores, quienes aportaron ideas y cuyas discusiones permitieron llegar a la definición de la causa raíz. El equipo se conformó por el gerente general, la gerente de calidad y producto, el supervisor senior de producción, los cuatro supervisores junior, el técnico en mantenimiento y el técnico eléctrico.

A continuación, se realiza el ejercicio completo de los 5 porqués.

1. ¿Por qué se generan las obstrucciones en los elementos del Front End Vacuum System?

- Porque se acumulan barnices y ceras en las tuberías.

Figura 10 Hallazgos de obstrucciones en el sistema durante los paros para revisión y limpieza



Fuente: Técnicos de mantenimiento.

En la figura 10 se pueden observar los depósitos en las tuberías del sistema.

2. ¿Por qué se acumulan barnices y ceras en las tuberías?

- Porque la temperatura de operación en ciertos puntos del sistema es inferior a la recomendada.

3. ¿Por qué la temperatura es inferior a la recomendada?

- Porque hay un aislamiento insuficiente en las tuberías y una calibración inadecuada de los controles de temperatura.

En la figura 11 se puede observar que el aislamiento puede que no sea el adecuado ni el suficiente para mantener la alta temperatura dentro de la tubería. Al bajar la temperatura, los barnices y ceras se condensan y causan las obstrucciones.

Figura 11 Aislamiento térmico en la sección del sistema



Fuente: Elaboración propia

4. ¿Por qué el aislamiento es insuficiente y los controles están mal calibrados?

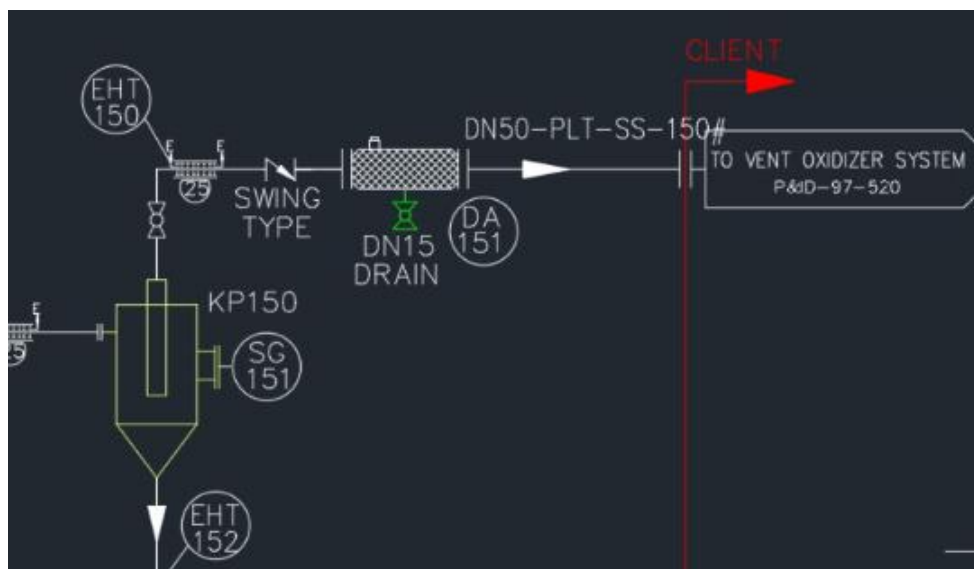
- Porque durante el diseño e instalación no se consideró adecuadamente la protección térmica en ciertas secciones clave.

5. ¿Por qué no se consideró adecuadamente la protección térmica?

- Porque hubo un mal diseño de planta en el área del Front End Vacuum System, que no contempló simulaciones detalladas ni un análisis exhaustivo de las condiciones operativas.

La causa raíz refleja que el diseño inicial del equipo genera dificultades a la hora de hacer los mantenimientos correctivos que el equipo necesita para funcionar de manera óptima. En la figura 12 se puede observar la configuración inicial del equipo. Los problemas de atascamiento por formación de barnices y ceras se presentan entre el KP150 y el VENT OXIDIZER. En esta sección, que se presenta con una línea naranja en la figura 4, hay pocos elementos, a saber, una válvula, un elemento intercambiador de calor, una válvula check, tipo “Swing”, y un “Detonation Arrester (DA)”.

Figura 12 Diagrama de flujo inicial de la sección del Front End Vacuum System



Fuente: Elaboración propia

Esta sección del equipo es la que se encarga de generar vacío en el sistema, y con ello también extrae la fracción gaseosa que se genera en el Flash Tank. Cuando se presentan los atascamientos, se pierde el vacío en el sistema y se genera una sobrepresión en el tanque de condensados que acaba por tirar la válvula de seguridad, y genera la salida de líquidos malolientes.

El fin de la fracción gaseosa es que se quemé en la llama del Heater. Cuando este producto se condensa, además de causar los atascamientos, la parte que queda en estado líquido puede dañar el funcionamiento del Heater. Por lo que es de suma importancia no permitir que esos gases condensados continúen su camino.

El diseño inicial no contempló que, en nuestro país, las variaciones en la materia prima de ingreso al sistema pueden ser significativas, por lo que las simulaciones térmicas posiblemente debían tener un rango más grande para abarcar las condensaciones de los materiales que obstruyen la tubería.

4.5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS

El análisis de causa raíz arroja los siguientes hallazgos clave:

1. Las obstrucciones en el Front End Vacuum System son causadas principalmente por un mal diseño del equipo en esta área, el cual derivó en deficiencias en el aislamiento y el control térmico, provocando la generación de barnices y ceras. En la figura 10 se puede observar la formación de material depositado en la tubería lo que genera presión dentro del sistema. Además, la tabla 1 muestra que el equipo debió parar para más de 5000 horas durante siete meses, limpiar y retirar los restos depositados en esta sección, y siempre se encontró la formación del mismo depósito.
2. Estas deficiencias son resultado de decisiones tomadas en la etapa de diseño, donde no se realizaron simulaciones detalladas ni se contemplaron protecciones adicionales para mantener las temperaturas correctas y así evitar la condensación de los barnices dentro de la tubería. La tecnología del UORS fue desarrollada por

la empresa Pragmatic Environmental Solutions Company (PESCO) y los módulos se construyen y ensamblan en la India, a cargo de la empresa HAMSA, desde donde se envían a cada destino. Al ser una tecnología tan novedosa, aún se están descubriendo puntos de mejora. Cuando se le consultó al ingeniero químico encargado del diseño, indicó que la calidad y la composición de las materias primas es tan variable, que aún, haciendo simulaciones de temperatura y colocando las mangas de protección térmica, ciertos componentes con altos puntos de fusión se pueden condensar y solidificar, pues la temperatura no es lo suficiente para que vayan líquidos junto con el resto del fluido.

3. La falta de un programa de mantenimiento preventivo y predictivo que incluya monitoreo de temperaturas y limpieza regular contribuye a la recurrencia del problema. Al no tener un plan de mantenimiento, la corrección del problema de obstrucción se aborda siempre como un mantenimiento correctivo, provocando paros no programados del equipo, disminuyendo la disponibilidad, y con ello la productividad del módulo reflejado en el indicador OEE. Para los primeros 7 meses del año, el OEE estuvo por debajo del 50%. Durante estos meses, el módulo se detuvo durante más de 5500 horas por mantenimiento correctivo en el área del Front End Vacuum System.

CAPÍTULO V: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN

5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PROPUESTAS

Con base en el análisis de causa raíz desarrollado en el capítulo anterior, se proponen las siguientes soluciones. Algunas de ellas se implementarán, y otras se recomiendan como propuestas para su futura implementación.

Tabla 7 *Relación entre causas raíz y propuestas de mejora del proyecto*

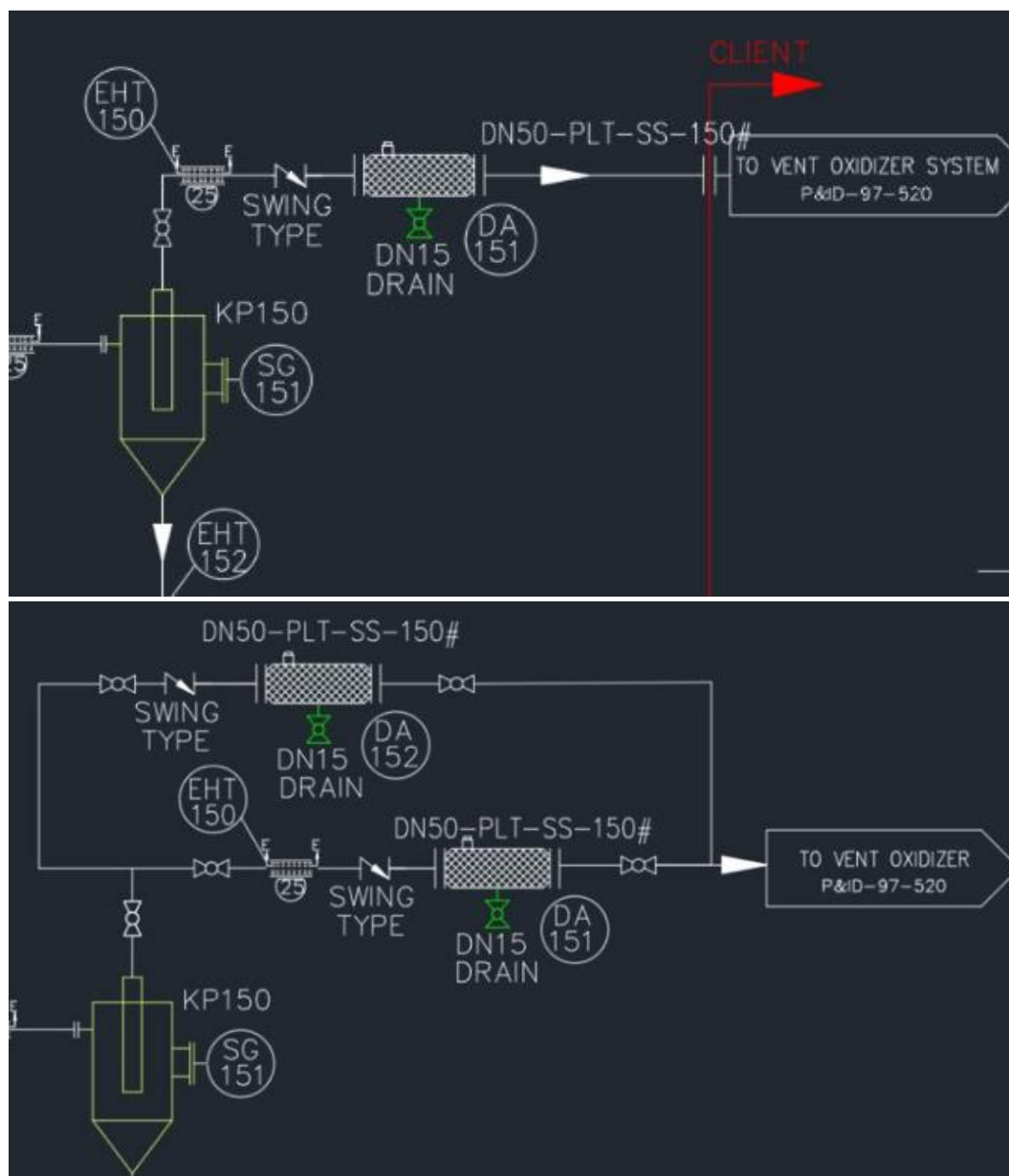
Problema - Causa Raíz encontrada	Propuesta de mejora
Atascamiento por diseño erróneo del equipo en la sección del Front End Vacuum System	Construir un bypass para desviar los gases mientras se quitan los atascamientos y se limpia la línea.
Ausencia de planes de mantenimiento preventivo	Implementar un sistema de órdenes de trabajo que respondan a un plan de mantenimientos preventivos programados.
Capacitación insuficiente de los colaboradores	Establecer un plan de capacitaciones para los colaboradores que incluya los cambios hechos en la configuración del equipo y la ejecución de los mantenimientos preventivos.

5.2 PROPUESTA DE CONSTRUCCIÓN DE BYPASS

La principal propuesta es hacer un bypass en la sección que se atasca, para que, cuando se observe que está subiendo la presión en la línea, se pueda enviar el flujo a través del bypass mientras se revisa, desmonta, limpia y arma de nuevo la línea principal. En la figura 10 es posible ver la gran cantidad de material que se acumula en las tuberías. Con esta propuesta se procura que el proceso permanezca sin

alteraciones y se evita el paro de la producción. En la figura 13 se muestra la configuración inicial del equipo, así como la propuesta del nuevo diseño.

Figura 13 Propuesta de diseño de bypass en la línea del Front End Vacuum System



Fuente: Elaboración propia.

Nota: La primera imagen es de la configuración inicial, y la segunda es la propuesta planteada para desviar el flujo de material mientras se limpia la sección original.

5.3 VIABILIDAD ECONÓMICA DE LAS PROPUESTAS

Para evaluar la viabilidad económica de la propuesta se determinaron las siguientes variables: costo de las horas invertidas en el diseño de la propuesta, costo de materiales para la construcción del bypass, costo de las horas de mano de obra del recurso humano necesario para la construcción del bypass, costo de la hora de capacitación del personal involucrado y el costo del mantenimiento mensual requerido por el bypass.

Tabla 8 Inversión para diseño de la propuesta y capacitación del personal involucrado

<i>Actividad</i>	<i>Responsable</i>	<i>Salario por hora</i>	<i>Cantidad de horas</i>	<i>Total inversión</i>
<i>Diseño de propuesta</i>	Supervisor	¢ 7 445	10	¢ 74 450
	Gerente de planta (Instructor)	¢ 18 620	1	¢ 18 620
	3 Supervisores	¢ 7 445	1	¢ 22 344
<i>Capacitación</i>	Técnico mecánico	¢ 5 958	1	¢ 5 958
	Técnico eléctrico	¢ 4 841	1	¢ 4 841
	Encargado de bodega	¢ 4 841	1	¢ 4 841
	8 Operarios	¢ 3 478	1	¢ 27 825
			<i>Total</i>	¢ 158 809

También se calcula la cantidad promedio mensual de VGO que se dejaba de producir por causa de los paros no programados debidos a atascamientos en el Front End Vacuum System. La cantidad promedio de VGO multiplicada por su precio de venta da como resultado los ingresos mensuales que requiere el cálculo del TIR y del VAN. Con esta información se elabora un cuadro de cálculo, usando la herramienta Excel. La figura 14 muestra la orden de trabajo que se elaboró para programar el trabajo de construcción del nuevo diseño. De esta figura se obtiene el valor de la inversión inicial del proyecto, ya que toma en cuenta todos los insumos requeridos, así como la mano de obra requerida para la actividad.

Figura 14 Orden de trabajo generada para la construcción del bypass



ORDEN DE TRABAJO

NUMERO OT	EQUIPO	PRIORIDAD	ESTADO	TIPO
1	UORS FRONT END VACUUM SKID	ALTA	CERRADA	CORRECTIVA
V.CONTROL	VAL. VARIABLE	SUPERVISOR	PLANEADOR	FECHA PROG.
N/A	0.0	KELVIN OBANDO	KELVIN OBANDO	16/09/2024
FECHA INICIO	FECHA FIN	COSTO M.O	COSTO REPUESTOS	COSTO TOTAL
23/09/2024	03/10/2024	128119.02	1073227.0	1201346.02

TRABAJO A REALIZAR

CONFECCIÓN E INSTALACIÓN DE BYPASS EN LÍNEA DEL FROND END VACUUM SKID

TAREAS

DESCRIPCION	TIEMPO
SOLDAR Y ARMAR FIGURA BYPASS	12
INSTALACIÓN DE FIGURA BYPASS	6

TECNICOS

TECNICO	ESPECIALIDAD	TIEMPO	COSTO HORA	COSTO TOTAL
CARLOS RODRIGUEZ	MECÁNICO	18	5958.33	107249.94
JÓSE GÓMEZ	MECÁNICO	6	3478.18	20869.08

REPUESTOS

REPUESTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UND	COSTO TOTAL
VAL. FLANGER C/150 A/INOX 2"4		4	103000	412000
TEE DE 2" SCH 40 T-304	3	3	23451	70353
CHECK INOX 200# A-690-T 2"	1	1	20170	20170
EMP. ESPIROMETAL C-150# 2"	10	10	3150	31500
FLANGER INOX T/304 C-150 2"	10	10	28745	287450
SOLDURA INOX 3/32 308	5	5	28200	141000
TL HEX G2 RO 5/8 X 2-1/2	60	60	545.9	32754
TUBO A/INOX 6.00M A312 CED-110 2"		1	78000	78000

Fuente: Elaboración propia.

Figura 15 Orden de trabajo para mantenimiento semanal



ORDEN DE TRABAJO

NUMERO OT	EQUIPO	PRIORIDAD	ESTADO	TIPO
16 UORS FRONT END VACUUM SKID	BAJA		CERRADA	CORRECTIVA
V.CONTROL	VAL. VARIABLE	SUPERVISOR	PLANEADOR	FECHA PROG.
N/A	0.0	KELVIN OBANDO	KELVIN OBANDO	11/12/2024
FECHA INICIO	FECHA FIN	COSTO M.O	COSTO REPUESTOS	COSTO TOTAL
11/12/2024	11/12/2024	33277.32	4334.9	37612.22

TRABAJO A REALIZAR

LIMPIEZA DE LÍNEAS DEL FRONT END VACUUM SKID

TAREAS

DESCRIPCION	TIEMPO
LIMPIEZA DEL DETONATION ARRESTER	4

TECNICOS

TECNICO	ESPECIALIDAD	TIEMPO	COSTO HORA	COSTO TOTAL
CRISTIAN SÁNCHEZ	ELÉCTRICO	4	4841.15	19364.6
EMILIO SALAS	ELÉCTRICO	4	3478.18	13912.72

REPUESTOS

REPUESTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UND	COSTO TOTAL
SODA CÁUSTICA	KG	10	433.49	4334.9

OBSERVACIONES

DESCRIPCION
LIMPIEZA DE DA Y VÁLVULA CHECK CON SODA CÁUSTICA Y VAPOR

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la figura 15 se observa la orden de trabajo que se genera semanalmente para limpiar el bypass, ya que se encontró que hacerlo a manera de mantenimiento preventivo programado es más eficaz que esperar a que empiece a aumentar la presión en el sistema para hacer la limpieza.

Figura 16 Cálculo del TIR y el VAN con los datos obtenidos de las órdenes de trabajo

Datos	Inversión inicial		₡	1,360,254.80
	Tasa anual mínima aceptable de rendimiento			12.0%
	Tasa mensual mínima aceptable de rendimiento			1.0%
Periodo mensual	Ingreso	Egreso	Flujos de efectivo neto	Valor presente
0			-₡ 1,360,254.80	-₡ 1,360,254.80
1	₡ 2,600,015.00	₡ 150,448.88	₡ 2,449,566.12	₡ 2,425,312.99
2	₡ 2,600,015.00	₡ 150,448.88	₡ 2,449,566.12	₡ 2,401,299.99
3	₡ 2,600,015.00	₡ 150,448.88	₡ 2,449,566.12	₡ 2,377,524.74
4	₡ 2,600,015.00	₡ 150,448.88	₡ 2,449,566.12	₡ 2,353,984.89
5	₡ 2,600,015.00	₡ 150,448.88	₡ 2,449,566.12	₡ 2,330,678.11
6	₡ 2,600,015.00	₡ 150,448.88	₡ 2,449,566.12	₡ 2,307,602.09
7	₡ 2,600,015.00	₡ 150,448.88	₡ 2,449,566.12	₡ 2,284,754.55
8	₡ 2,600,015.00	₡ 150,448.88	₡ 2,449,566.12	₡ 2,262,133.21
9	₡ 2,600,015.00	₡ 150,448.88	₡ 2,449,566.12	₡ 2,239,735.86
10	₡ 2,600,015.00	₡ 150,448.88	₡ 2,449,566.12	₡ 2,217,560.25
11	₡ 2,600,015.00	₡ 150,448.88	₡ 2,449,566.12	₡ 2,195,604.21
12	₡ 2,600,015.00	₡ 150,448.88	₡ 2,449,566.12	₡ 2,173,865.56
Valor presente de la suma de flujos actualizados				₡ 27,570,056.46
Valor actual neto (VAN)				₡26,209,801.7
Tasa interna de retorno (TIR)				180.1%
Índice de rentabilidad (B/C)				20.268

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos de la inversión inicial y de los mantenimientos regulares se puede calcular el TIR y el VAN como en se muestra en la figura 16. Según comunicaciones personales con el gerente general de la empresa, se busca una tasa de descuento del 12% para las inversiones de este tipo. El valor de los egresos se calculó multiplicando el costo de los mantenimientos semanales por cuatro, pues se requiere el valor mensual de ese egreso.

Por otra parte, los ingresos se determinaron de la siguiente manera: de la tabla 1 se deriva que hubo 5765 minutos de paro debidos a atascamiento en el Front End Vacuum System. Esta cantidad de minutos de paro promediada por cada mes equivale a 823,6 minutos por mes. En este tiempo es posible producir 6341,5 L de VGO, el cual se vende a ¢410 el litro. De allí que el ingreso mensual se calcule el ¢2 600 015.

El TIR se calculó en casi un 180%, siendo este resultado bastante mayor a la tasa de descuento utilizada, lo que significa que el proyecto económicamente factible. Para apoyar aún más la viabilidad económica, el cálculo del VAN bastante mayor a uno, reforzando que el proyecto es viable desde el punto de vista económico.

5.4 IMPLEMENTACIÓN DE LAS PROPUESTAS

5.4.1 Construcción del bypass

Dado que el estudio de viabilidad económica resultó positivo, como se demostró en la sección anterior, y a la urgencia de la empresa por evitar paros no programados, las jefaturas autorizaron la implementación de la propuesta.

El diagrama de Gantt de la figura 19 muestra la secuencia y organización de actividades que se llevaron a cabo para la implementación del proyecto. Inicialmente

se analiza cuál es la principal problemática que ocasiona los paros en Front End Vacuum System. Este análisis se detalla en el capítulo anterior. El diseño de la propuesta tomó alrededor de 13 días.

Una vez estudiada la propuesta, y aprobada por jefaturas, se procedió con la cotización de los materiales requeridos para, a partir de esta información, evaluar la viabilidad económica de la propuesta. Al resultar positiva, se solicita de nuevo la aprobación a las jefaturas para la construcción de la propuesta.

La construcción del bypass tardó 4 días y se requirió la participación de un técnico en electricidad y un técnico en mantenimiento. La siguiente secuencia de fotografías en la figura 17 muestra el armado del bypass.

Figura 17 *Secuencia de armado del bypass*



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 18a, se puede observar la configuración inicial del equipo y, a su lado, en la figura 18b, se muestra cómo quedó ya terminada la instalación.

Figura 18 Antes y después del ensablado del bypass



Fuente: Elaboración propia

Nota: Figura 18a Configuración inicial, 18b Configuración final.

Se puede observar en la fotografía de la figura 18b que además se toma en cuenta también una pequeña ampliación o plataforma con las medidas de seguridad correspondientes para poder realizar los movimientos de cambio de la línea principal a la línea del bypass mientras se llevan a cabo los mantenimientos.

5.4.2 Etapa de pruebas

Según el diagrama de Gantt de la figura 19, las pruebas se llevaron a cabo el 4 y el 5 de octubre de 2024. Con el equipo en marcha, ya alcanzadas las condiciones óptimas de operación y sin alteraciones en las presiones del Front End Vacuum System, se procedió a abrir las válvulas del bypass cuidadosamente, revisando la presencia de alguna fuga. Cuando se aseguró que el bypass mantenía un flujo a través de él, se cerró la línea principal, monitoreando las presiones del sistema.

Se encontró que las condiciones se mantuvieron constantes mientras se utilizaba el bypass. Para estas pruebas, el equipo se mantuvo operando con bypass por alrededor de 6 horas.

Como parte de la verificación del proyecto con respecto a su implementación, se revisó la bitácora de paros desde el 8 de octubre hasta el 31 de diciembre del año 2024. La tabla de paros no programados para el UORS se muestra en la tabla 9.

En la tabla resumen, no aparecen paros por atascamiento ni problemas en el Front End Vacuum System, lo que demuestra que la implementación del bypass, así como la oportuna limpieza de la línea principal evitan que el proceso productivo se detenga por esta causa.

Tabla 9 Resumen de paros no programados luego de la instalación del bypass

Causa de paro	Tipo de falla	Tiempo total en paro (min)
Bajo inventario	Producción	15197
Trabajos en línea de Fluido Térmico	Mecánico	960
Fallo de arranque por falta de vacío	Mecánico	720
Fallo en el evaporador 200	Mecánico	510
Fallo de motor P210	Mecánico	180
	Suma	17567

Fuente: Elaboración propia

Con los datos de esta tabla se puede volver a calcular la productividad con el indicador OEE. Entre el 8 de octubre y el 31 de diciembre de 2024, el tiempo total disponible fue de 120 960 minutos, de los cuales, 17 567 minutos fue el tiempo de paro, por lo que la disponibilidad de equipo se calcula en 85,5%, convirtiéndose en un factor de 0.855. El rendimiento del equipo y la calidad se mantuvieron constantes durante todo el año con valores de 73% y 100% respectivamente, por lo que el OEE pasó de 46,2% a 62,4%, aumentando 16,2 puntos porcentuales, equivalentes a un 35% de mejora en el indicador.

En el Apéndice 2 se detallan los paros luego de la implementación de la propuesta.

5.4.3 Etapa de elaboración de instructivo y de capacitación






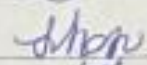



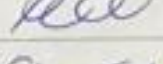
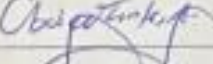

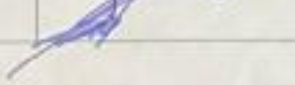
Las tareas de cambio de líneas para la limpieza de la tubería principal están a cargo de los operarios en turno. Por esta razón se detalló un instructivo con los pasos a seguir, con el formato del sistema de gestión de la empresa, y con ello se programó una capacitación para el equipo donde se explica cómo se realiza el procedimiento del cambio y se refuerza el procedimiento de limpieza de las tuberías. El instructivo se encuentra en el Apéndice 3.

También se consideró importante recordar y resaltar la importancia del uso del equipo de protección personal durante la realización de estas actividades de mantenimiento, ya que se utilizan materiales peligrosos como la soda caustica, y se trabaja con materiales que pueden estar a temperaturas elevadas. La figura 20 muestra la hoja de firmas de la asistencia a la capacitación.

Figura 20 Asistencia a la capacitación de uso y limpieza del Bypass en el Front End Vacuum System

METALUB™
CAMBIE MÁS QUE SU ACEITE

Registro de capacitación: Actualización sobre uso del Bypass
 Establecimiento: Sala de Juntas y Módulo URS
 Instructor/a: Lesmes Miranda Fecha: 11-10-2024

Nombre	Puesto	Firma
Carlos Rodríguez	Mec. industrial	
Jean Espinosa	Operario	
Ampli. Espinosa	operario	
Sonia Benocal	Operario	
Kevin Rojas A	Operario	
Jhon Mora S.	operario	
José León Anayo	operario	
Brandon Bell	Bodega	
Daniel Pérez Meléndez	Operario	
Kelvin Obando	Supervisor	
Abdel Ferrer M.	Supervisor	
Antonio Sánchez R.	MTO.	
José Luis F.	pprodt	

Fuente: Elaboración propia.

5.4.4 Etapa de seguimiento y control de la implementación

Como se mencionó anteriormente, el seguimiento y verificación de la eficacia de la implementación se realizó durante tres meses, del 8 de octubre al 31 de diciembre. En este periodo se logró determinar que la frecuencia propuesta de un mantenimiento semanal fue eficaz, ya que no se presentaron atascamientos en la vía principal. Esto no quiere decir que no se formaran ceras y barnices, si no que se la acumulación de material no causó atascamientos totales, y se envió el flujo por el bypass mientras se le daba mantenimiento a la línea principal.

Para el control de las actividades de mantenimiento, la empresa adquirió un software con el cual se elaboran las de órdenes de trabajo para el mantenimiento preventivo, en conjunto con un plan de mantenimiento preventivo. Una muestra del plan se encuentra en el Anexo 1.

Figura 21 Programa utilizado para elaborar las órdenes de trabajo para las actividades de mantenimiento

**SOFTWARE PARA GESTION DE ORDENES DE TRABAJO
VALBOR SOLUCIONES**

MODULO OTS

Nueva OT | Modificar OT

NUMERO OT: 1 | EQUIPO: UORS FRONT END VAC | TIPO OT: CORRECTIVA

PRIORIDAD OT: ALTA | V.CONTROL: N/A | VAL.VARIABLE: 0

ESTADO OT: CERRADA | SUPERVISOR: KELVIN OBANDO | PLANEADOR: KELVIN OBANDO

FECHA PROG: 16/09/2024 | FECH. INICIO: 23/09/2024 | FECH. FIN: 03/10/2024

TRABAJO A REALIZAR: CONFECCIÓN E INSTALACIÓN DE BYPASS EN LÍNEA DEL FROND END VACUUM SKID

Tareas | Tecnicos | Repuestos | Observaciones

TIEMPO TOTAL: 18
COSTO M.O: 128119.02
COSTO REPUESTOS: 1073227
COSTO TOTAL: 1201346.02

Guardar OT | Actualizar OT | Imprimir OT | Cerrar

Fuente: Elaboración propia

Se propone a la gerencia seguir llevando control mensual de la productividad a partir del indicador OEE.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- A partir del análisis de causa raíz se determinó que la principal causa de paros no programados relacionados al mantenimiento de la máquina fueron los provocados por obstrucciones en los elementos del Front End Vacuum System.
- Se planteó a la alta gerencia un rediseño de la sección donde se encontró la mayor problemática de atascamiento. La propuesta fue estudiada y aceptada por las jefaturas.
- El cálculo del TIR y el VAN demostraron que la propuesta era económicamente viable y se tuvo el visto bueno de la alta gerencia para la puesta en marcha del proyecto.
- Con la implementación de la propuesta se logró aumentar en 16 puntos porcentuales el indicador OEE de productividad, pasando de 46,2% a 62,4%, lo que respalda la efectividad de la propuesta en cuanto a aumento en la productividad del proceso.
- El desarrollo de este proyecto permitió evidenciar la importancia de un mantenimiento eficiente en los procesos industriales, demostrando que la implementación de estrategias de mejora contribuye significativamente a la reducción de paros no programados y al incremento de la productividad. A través del análisis de datos y la aplicación de metodologías adecuadas, se logró identificar y mitigar los principales factores que afectaban la operación del módulo UORS de la empresa Metalub.
- Además, la investigación resaltó la relevancia de la planificación preventiva y predictiva, así como el uso de herramientas tecnológicas para optimizar la gestión

del mantenimiento. Los resultados obtenidos validan la factibilidad y beneficios de la propuesta, tanto en términos de eficiencia operativa como de impacto económico.

- Asimismo, se comprobó que la capacitación del personal juega un papel crucial en la correcta ejecución de los planes de mantenimiento, ya que el conocimiento adecuado permite identificar fallas con mayor rapidez y prevenir futuros problemas.
- La implementación de tecnologías digitales y el monitoreo en tiempo real son aspectos fundamentales que deben ser considerados para mejorar la confiabilidad del sistema y minimizar riesgos operativos.
- Finalmente, se concluye que la mejora continua en los procesos de mantenimiento no solo impacta positivamente la productividad, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental y financiera de la empresa. La reducción de tiempos muertos, el uso eficiente de los recursos y la optimización del proceso de reciclaje de aceite usado representan beneficios tanto para la organización como para el medio ambiente.

6.2 RECOMENDACIONES

- Implementar de manera continua el plan de mantenimiento propuesto, asegurando su actualización periódica para adaptarse a posibles cambios en la operación.
- Capacitar al personal de mantenimiento en nuevas metodologías y tecnologías que puedan optimizar aún más los procesos de supervisión y reparación de equipos.

- Integrar herramientas digitales de monitoreo y diagnóstico en tiempo real para fortalecer el mantenimiento predictivo y minimizar futuras fallas.
- Evaluar periódicamente la efectividad de las estrategias implementadas mediante indicadores de desempeño, con el fin de realizar ajustes oportunos y garantizar la mejora continua.
- Fomentar una cultura organizacional orientada a la eficiencia y sostenibilidad, promoviendo el compromiso de todos los colaboradores en la optimización del proceso de reciclaje de aceite usado.

REFERENCIAS

- Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K., Sattarpanah, S., Dhouib, R., Ibrahim, H., & Adda, M. (2022). On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges. *Applied Sciences*, 12(16), s.p. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/16/8081>
- Acuña Araya, J., & Campos Ureña, L. (2017). *Mejoramiento de la productividad y cumplimiento de la programación de entregas de vehículos en la planta de Romero Fournier, Costa Rica*. (Tesis para optar por el grado de Ingeniería Industrial), Universidad Hispanoamericana, Costa Rica.
- Ahmed, D., Raad, M., Chali, M., & Bahjat, A. (2024). Purification of Used Lubricating Oils Using Vacuum Distillation. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 14(1), 111-130. Retrieved from <https://www.iasj.net/iasj/download/02f8183876023754>
- Alfares, H. (2023). Introduction to Petroleum and Petrochemical Industries. In *Applied Optimization in the Petroleum Industry* (pp. 2-4). Springer.
- Angel Gasca, R., & Olaya Vargas, H. (2014). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la empresa Agroangel*. (Tesis para optar por título en Ingeniería Mecánica), Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- Añez, C. (2022). Huella carbónica e hidrocarburos en Latinoamérica. Relación causal y opción por energías verdes. In E. García, & E. Rincón, *Petróleo y energías desde las ciencias humanas, sociales y ambientales en América Latina y Caribe* (p. s.p.). Victoria: Fontamara. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=1GbiEAAAQBAJ&oi=fnd&p>

g=PT91&dq=petr%C3%B3leo+y+energ%C3%ADa&ots=n0LHjK-

JGB&sig=URgUBNqQxzyIB1Q680LI-

kDw9VE#v=onepage&q=petr%C3%B3leo%20y%20energ%C3%ADa&f=false

Atta, M., Khan, H., & Ali, M. (2024). Simulation of Vacuum Distillation Unit in Oil Refinery: Operational Strategies for Optimal Yield Efficiency. *Energies*, 17, 2-15.

doi:10.3390/en17153806

Baca, G., Cruz, M., & Cristobal, M. (2014). *Introducción a la ingeniería industrial*.

Tehuacan: Patria S.A. de C.V.

Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C., Wuest, T., & Stahre, J. (2020). Smart Maintenance:

a research agenda for industrial maintenance management. *International*

Journal of Production Economics, 224, s.p. Retrieved from

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527319303731>

Cambar, A., & Ocampo, J. (2015). *Integrando la Metodología DMAIC de Seis Sigma*

con la simulación de eventos discretos en Flexim. Retrieved from Cloudfront.net:

<https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/30038413/RP147-with-cover-page->

[v2.pdf?Expires=1645318691&Signature=SXgVnjfp4l6T0s8Xcs9GL2R14vYxBI](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/30038413/RP147-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1645318691&Signature=SXgVnjfp4l6T0s8Xcs9GL2R14vYxBI)

[DnmOr4oD2dLXTateXI-RejhCnC-HEUz1FQE9B3-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/30038413/RP147-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1645318691&Signature=SXgVnjfp4l6T0s8Xcs9GL2R14vYxBI)

[dVdcy16ctrvWZ~3xGgx~X1bjWCddBj~3jYjUNoBby229Htlj1uCWsRbxo0xTDpu](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/30038413/RP147-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1645318691&Signature=SXgVnjfp4l6T0s8Xcs9GL2R14vYxBI)

[IbhalG8PXye5WHWU45](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/30038413/RP147-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1645318691&Signature=SXgVnjfp4l6T0s8Xcs9GL2R14vYxBI)

Cansino Flores, E. (2015). *Elaboración de un plan de mantenimiento preventivo y*

seguridad industrial para la fábrica MINEROSA. (Tesis para optar por el título

de Ingeniería Mecánica), Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.

Cruelles, J. A. (2013). *Ingeniería Industrial. Métodos de trabajo, tiempos y su aplicación*

a la planificación y a la mejora continua. Alfaomega.

- de Pareto, D. (2014). *Diagrama de Pareto*. Retrieved from Quees: [http://www. quees.info/diagrama-de-pareto. html](http://www.quees.info/diagrama-de-pareto.html)
- Espinoza Vasquez, M. (2022). *Mejora de procesos productivos utilizando herramientas de distribución de planta y diseño de métodos en la PYME Recomendados del Pacífico para el primer semestre del año 2022*. (Tesis para optar por el título de Ingeniería Industrial), Universidad Hispanoamericana, Costa Rica.
- Gallach, F., Gisbert, V., Pérez, A. I., & Perez-Bernabeu, E. (2020). Diagrama de Pareto y Lean Manufacturing. *Cuadernos de investigación aplicada*, 19, 25-30.
- García Mallqui, E. (2016). *Implementación de un plan de mantenimiento preventivo en función de la criticidad de los equipos del proceso productivo para mejorar la disponibilidad de la empresa UESFALIA ALIMENTOS S.A.* (Tesis para optar por el título de Ingeniería Industrial), Universidad Privada del Norte, Perú.
- García, E., & Gonzales, J. (2016). *Diagrama de flujo*. Retrieved from http://odin.fib.unam.mx/salac/practicafp/fp_p5.pdf
- González, J. (2024, Setiembre). *Evolución Pro*. Retrieved from Diagrama de Gantt y su importancia en gestión de proyectos: <https://evolucionapro.com/diagrama-de-gantt-caracteristicas/>
- Gutiérrez Pulido, H., & Vara Salazar, R. (2013). *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma*. McGraw-Hill. <https://ebooks7-24.com:443/?il=280>.
- Hamsa Environmental Solutions. (2019). *Hamsa Environmental Solution*. Retrieved from Solvent Extraction for Upgrading Base Lube Distillates: <https://www.hamsaenvironmental.com/copy-of-used-lubricating-oil-re-ref>

- Hamsa Enviromental Solutions. (2019b). *Hamsa Enviromental Solution*. Retrieved from Lube Polishing: <https://www.hamsaenvironmental.com/copy-of-solvent-extraction-technolo>
- Herrera, L., León, C., Jaramillo, X., Arias, V., & León, W. (2024). Fractional Distillation: Types of Mixture Compatible with your Process. *Revista Veritas De Difusão Científica*, 5(2), 375–394. doi:10.61616/rvdc.v5i2.92
- Hyne, N. (2012). *Petroleum. Geology, Exploration, Drilling and Production* (Tercera ed.). Tulsa, Oklahoma: Pennwell. Retrieved from <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-nontechnicalguidetopetroleumgeology.pdf>
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2022, Setiembre). *Guía para la elaboración de diagramas de flujo de los procesos institucionales*. Retrieved from Repositorio IICA: <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/21020/Gu%c3%ada%20para%20la%20elaboraci%c3%b3n%20de%20diagramas%20de%20flujo%20de%20los%20procesos%20institucionales.pdf?sequence=5>
- Jacobs, F. R. (2022). *Administración de operaciones*. McGraw-Hill Interamericana. <https://ebooks7-24.com:443/?il=16843>.
- Kozhakhmetova, D., Kaliyeva, S., & Sugurova, L. (2024). Analysis of the Distillation Column of a Catalytic Cracking Unit Using Fuzzy Input Information. *Energies*, 17(17), 4446. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/17/4446>
- Lee, D. (2024, junio 16). *Chevron Lubricants*. Retrieved from Industria: https://latinamerica.chevronlubricants.com/es_mx/home/learning/from-

chevron/personal-rec-vehicules-and-equipment/base-oil-basics-quality-starts-at-the-base.html

Martins, J. (2022, 01 31). *asana*. Retrieved from <https://asana.com/es/resources/gantt-chart-basics>

Maynard, H. (1953, 1 1). Encyclopedia Americana. *Industrial Engineering*. New York, USA.

Mejía Carvajar, R. (2018). *Diseño de un plan de administración de mantenimiento para Oberg Medical, Barreal de Heredia Setiembre 2017-2018*. (Tesis para optar por el título de Ingeniería Industrial), Universidad Hispanoamericana, Costa Rica.

Méndez Cruz, S. (2017). *Aumento en la productividad del proceso de fabricación de Hidrox S en Industriales Austin de Costa Rica para el año 2017*. (Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Industrial), Universidad Hispanoamericana de Costa Rica, Costa Rica.

Montenegro Rosales, J. (2020). *Propuesta de un plan de mantenimiento de los equipos de refrigeración de los cuartos fríos en las bodegas de la Caja Costarricense de Seguro Social, ubicadas en San José, La Uruca durante el III cuatrimestre del 2020*. (Tesis para optar por el título de Ingeniería Industrial), Universidad Hispanoamericana, Costa Rica.

Morales, E. (2018). *Instituto de ingeniería del conocimiento*. Retrieved from <https://www.iic.uam.es/digital/como-medir-el-impacto-online-en-proyectos-sociales/>

Morris, L. (2020). Entre ingeniería, tecnología y productividad. *Entre ciencia e ingeniería*, 14(28), 7-9. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v14n28/1909-8367-ecei-14-28-7.pdf>

- Nsekuye, J. B., Erramli, O., Elouadi, A., Gretete, D., & Mushirabwoba, B. (2024). DMAIC-v2: A Novel Guide to the Improvement of Industrial Processes. *Smart Sustainable Manufacturing Systems*, 8(1), 24-58.
- Petrobras. (2024, julio 10). *Petrobras*. Retrieved from Gestión de Residuos en la Industria del Petróleo: Enfoques Sostenibles: <https://www.petrobras.com.ar/gestion-de-residuos-en-la-industria-del-petroleo-enfoques-sostenibles/>
- Pincirolì, L., Baraldi, P., & Zio, E. (2023). Maintenance optimization in industry 4.0. *Reliability Engineering & System Safety*, 234, s.p. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832023001199>
- Politeik, R., Dijkink, B., & Van den Boogaard, L. (2023). Comparing electrostatic separation of soy and lupin: Effect of de-oiling by solvent extraction. *LWT*, 187, 2. Retrieved from <https://pdf.sciencedirectassets.com/272383/1-s2.0-S0023643823X00139/1-s2.0-S0023643823008691/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEDMaCXVzLWVhc3QtMSJIMEYCIQDCxUIgL6ACZaLNO5THzB%2FemjqeeE9B5nyvYMoyqAJj9AlhAL6hFvz0Tk8Slxc%2BXYMyI%2BIS3lvVoeHSA722we>
- Pongboonchai-Empl, T., Antony, J., Garza, J., Komkowski, T., & Tortorella, G. (2024). Integration of Industry 4.0 technologies into Lean Six Sigma DMAIC: a systematic review. *Production planning and control*, 35. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09537287.2023.2188496#abstract>
- Quispe, Í. (2024, Octubre). *Arcux*. Retrieved from ¿Qué es AutoCAD y para qué sirve?: <https://arcux.net/blog/que-es-autocad-y-para-que-sirve/>

- Robayo, V. (2019). *Diagrama de Ishikawa*. Retrieved from Academia.edu: Ishikawa, K. (2013). D http://www.academia.edu/download/45800691/Diagrama_de_Ishikawa.pdf.
- Rocha Corea, J. (2021). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para las máquinas del área de empaque de Sigma Alimentos Costa Rica, a desarrollarse con información desde setiembre 2020 proyectado hasta mayo 2021*. (Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Industrial), Universidad Hispanoamericana, Costa Rica.
- Santillán, M., Montoya, D., & Suárez, S. (2019). Análisis comparativo de producción ecuatoriana de petróleo crudo y sus derivados, periodo 2017-2018. *PROSCIENCES: REVISTA DE PRODUCCIÓN, CIENCIAS E INVESTIGACIÓN*, 3(26), 8-16. Retrieved from https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/98429709/158-libre.pdf?1675906935=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAnalisis_comparativo_de_produccion_ecuat.pdf&Expires=1726946019&Signature=LTS7hazh0wCDwaC7ps0rEWOPS2k17xyXHCLWdNvUp7SZnaeVgIMFeXt7Mg
- Selley, R. (1998). *Elements of Petroleum Geology*. San Diego: Academic Press.
- Silvestri, L., Forcina, A., Introna, V., Santolamazza, A., & Cesarotti, V. (2020). Maintenance transformation through industry 4.0 technologies: A systematic literature review. *Computers in industry*, 123, 1-16. Retrieved from <https://sci-hub.se/10.1016/j.compind.2020.103335>
- Ulloa, A. R., Sánchez, A. d., & Balcazar, M. T. (2023). La productividad en empresa de la industria de la transformación. *Revista de Investigaciones Universidad de*

- Quindío*, 35(1), 236-247. Retrieved from <https://revistas.uniquindio.edu.co/ojs/index.php/riuq/article/view/1156/1802>
- Vaughn, R. (1988). *Introducción a la ingeniería industrial*. Barcelona: Reverté, S.A.
- Veliz, J. (2022, noviembre 1). *Mill's*. Retrieved from Consecuencias del mal mantenimiento industrial: <https://milma.cl/consecuencias-del-mal-mantenimiento-industrial/>
- Villena Andia, A. (2017). *Propuesta de implementación de un plan de mantenimiento de equipos bajos las técnicas del TPM en una empresa constructora*. (Tesis para optar por el título de Ingeniería Industrial), Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Perú.
- Vorne Industries. (2024). *OEE*. Retrieved from LEARN THE ART & SCIENCE OF MANUFACTURING IMPROVEMENT FROM VORNE: <https://www.oeec.com/>
- Yergin, D. (2011). *The Quest: Energy, Security, and the Remaking of the Modern World*. United States: PEARSON.

APÉNDICES

APÉNDICE 1

Tabla de tiempo perdido y sus causas del 1 de enero al 31 de julio

<i>Fecha</i>	<i>Tipo de falla</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Causa</i>
10/1/2024	Eléctrico	200	Fallo en el sistema de aterrizado
7/2/2024	Mecánico	336	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
7/2/2024	Eléctrico	20	Externa
19/2/2024	Eléctrico	47	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
22/2/2024	Eléctrico	33	Externa
25/2/2002	Mecánico	209	Fallo de bomba del Heater
27/2/2024	Eléctrico	15	Externa
5/3/2024	Producción	38880	Alto inventario
6/4/2024	Mecánico	5760	Fallo de bomba del Heater
13/4/2024	Mecánico	155	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
18/4/2024	Mecánico	125	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
19/4/2024	Mecánico	285	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
20/4/2024	Mecánico	180	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
23/4/2024	Mecánico	115	Falla de bomba P100
24/4/2024	Eléctrico	43200	Alto inventario
23/5/2024	Producción	61.8	Fallo de comunicación con PLC
27/4/2024	Eléctrico	130	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
1/6/2024	Mecánico	10	Externa
2/6/2024	Eléctrico	230	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
3/6/2024	Mecánico	60	Fallo de lanza del Heater
3/6/2024	Mecánico	85	Externa
4/6/2024	Eléctrico	230	Fallo de lanza del Heater
5/6/2024	Mecánico	50	Fallo de lanza del Heater
7/6/2024	Mecánico	255	Fallo de lanza del Heater
8/6/2024	Eléctrico	700	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
9/6/2024	Mecánico	360	Fallo de lanza del Heater
11/6/2024	Eléctrico	270	Fallo de bomba del Heater
14/6/2024	Mecánico	300	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
17/6/2024	Mecánico	257	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
18/6/2024	Mecánico	15840	Fallo de bomba del Heater
29/6/2024	Eléctrico	180	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
30/6/2024	Mecánico	60	Fuga en tubería
3/7/2024	Mecánico	225	Fallo de lanza del Heater
6/7/2024	Mecánico	340	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System

7/7/2024	Mecánico	681	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
8/7/2024	Mecánico	443	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
8/7/2024	Mecánico	215	Alta presión en FT100
9/7/2024	Mecánico	530	Alta presión en FT100
12/7/2024	Eléctrico	30	Externa
13/7/2024	Mecánico	250	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
14/7/2024	Mecánico	590	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
14/7/2024	Mecánico	35	Fallo de bomba del Heater
22/7/2024	Mecánico	35	Fallo de bomba del Heater
23/7/2024	Mecánico	310	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System
27/7/2024	Mecánico	226	Obstrucción en elementos del Front End Vacuum System

Tomado de la bitácora de producción.

APÉNDICE 2

Tabla de tiempo perdido y sus causas del 8 de octubre al 31 de diciembre

<i>Fecha</i>	<i>Tipo de falla</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Causa</i>
8/10/2024	Mecánico	720	Falta de vacío en el sistema
26/10/2024	Mecánico	180	Falla de motor de la P210
6/11/2024	Producción	3230	Bajo inventario
14/11/2024	Mecánico	510	Fallo de vacío en el evaporador 200
17/11/2024	Producción	5130	Bajo inventario
28/11/2024	Producción	6119	Bajo inventario
7/12/2024	Producción	718	Bajo inventario
9/12/2024	Mecánico	960	Trabajos en línea de fluido térmico

Tomado de la bitácora de producción.

APÉNDICE 3

Portada del Instructivo incluido en el sistema de gestión de la empresa. Para acceder al archivo, se debe dar doble clic sobre la portada.

INSTRUCTIVO PARA LA LIMPIEZA DE FIGURAS DEL FRONT END VACUUM SKID

Elaboró:

Revisó:

Aprobó:

Nombre

Nombre

Nombre

ANEXOS

ANEXO 1

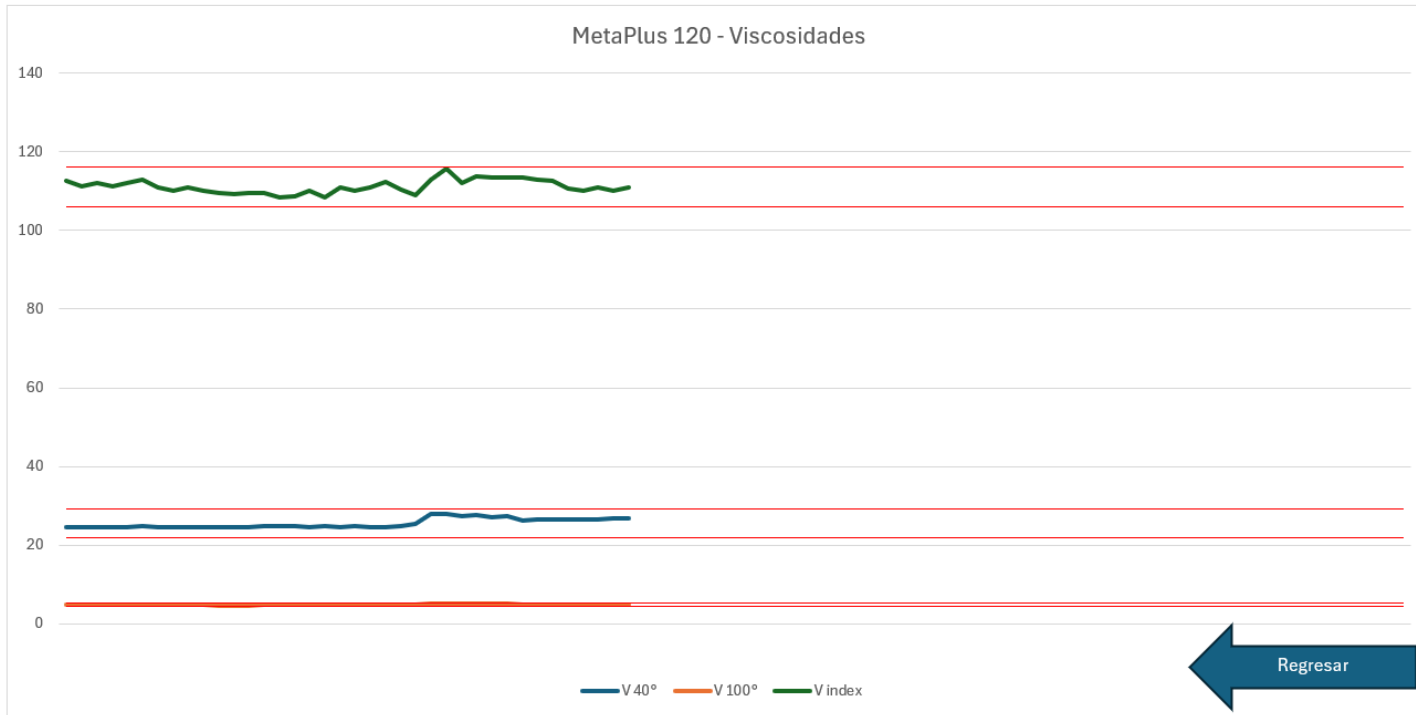
Plan de mantenimiento preventivo

Programador Anual De Mantenimiento Preventivo Por Fechas					19-Jan	20-Jan	21-Jan	22-Jan	23-Jan	24-Jan	25-Jan	26-Jan	27-Jan	28-Jan	29-Jan	30-Jan	31-Jan	1-Feb	2-Feb	3-Feb	4-Feb	5-Feb	6-Feb	7-Feb	8-Feb	9-Feb	10-Feb	11-Feb
CÓDIGO	MAQUINA	ACTIVIDAD	FRECUENCIA	FECHA INICIO	Sunday	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday	Monday	Tuesday
P1	UORS System Feed Pump	Preventivo mensual según MM-PR-0002	Mensual	27-Jan									X															
P1	UORS System Feed Pump	Preventivo trimestral según MM-PR-0002	Trimestral	27-Jan									X															
P1	UORS System Feed Pump	Preventivo anual según MM-PR-0002	Anual	27-Jan									X															
P2	UORS CAUSTIC DOSING PUMP	Preventivo trimestral según MM-IT-0003	Trimestral	27-Jan									X															
P100	UORS FLASHER RE-CIRCULATION PUMP A	Preventivo mensual según MM-PR-0001	Mensual	28-Jan										X														
P100	UORS FLASHER RE-CIRCULATION PUMP A	Preventivo trimestral según MM-PR-0001	Trimestral	28-Jan										X														
P100	UORS FLASHER RE-CIRCULATION PUMP A	Preventivo anual según MM-PR-0001	Anual	28-Jan										X														
P110	UORS WATER PRODUCT PUMP	Preventivo mensual según MM-PR-0001	Mensual	28-Jan										X														
P110	UORS WATER PRODUCT PUMP	Preventivo trimestral según MM-PR-0001	Trimestral	28-Jan										X														
P110	UORS WATER PRODUCT PUMP	Preventivo anual según MM-PR-0001	Anual	28-Jan										X														
P120	UORS DEISEL PRODUCT PUMP	Preventivo mensual según MM-PR-0001	Mensual	29-Jan											X													
P120	UORS DEISEL PRODUCT PUMP	Preventivo trimestral según MM-PR-0001	Trimestral	29-Jan											X													
P120	UORS DEISEL PRODUCT PUMP	Preventivo anual según MM-PR-0001	Anual	29-Jan											X													
P150	UORS LIQUID RING VACCUM PUMP	Preventivo mensual según MM-PR-0003	Mensual	29-Jan											X													
P150	UORS LIQUID RING VACCUM PUMP	Preventivo trimestral según MM-PR-0003	Trimestral	29-Jan											X													
P150	UORS LIQUID RING VACCUM PUMP	Preventivo anual según MM-PR-0003	Anual	29-Jan											X													
P151	UORS R151 DRAIN PUMP	Preventivo mensual según MM-PR-0001	Mensual	30-Jan												X												
P151	UORS R151 DRAIN PUMP	Preventivo trimestral según MM-PR-0001	Trimestral	30-Jan												X												

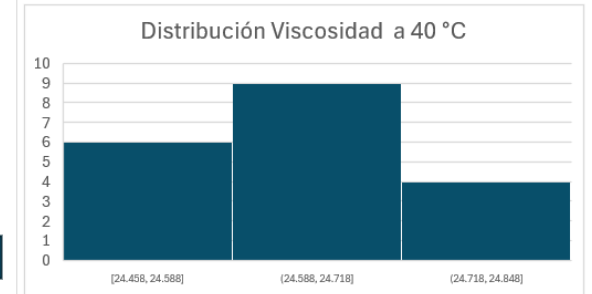
Fuente: Gerencia de Planta, Empresa Metalub

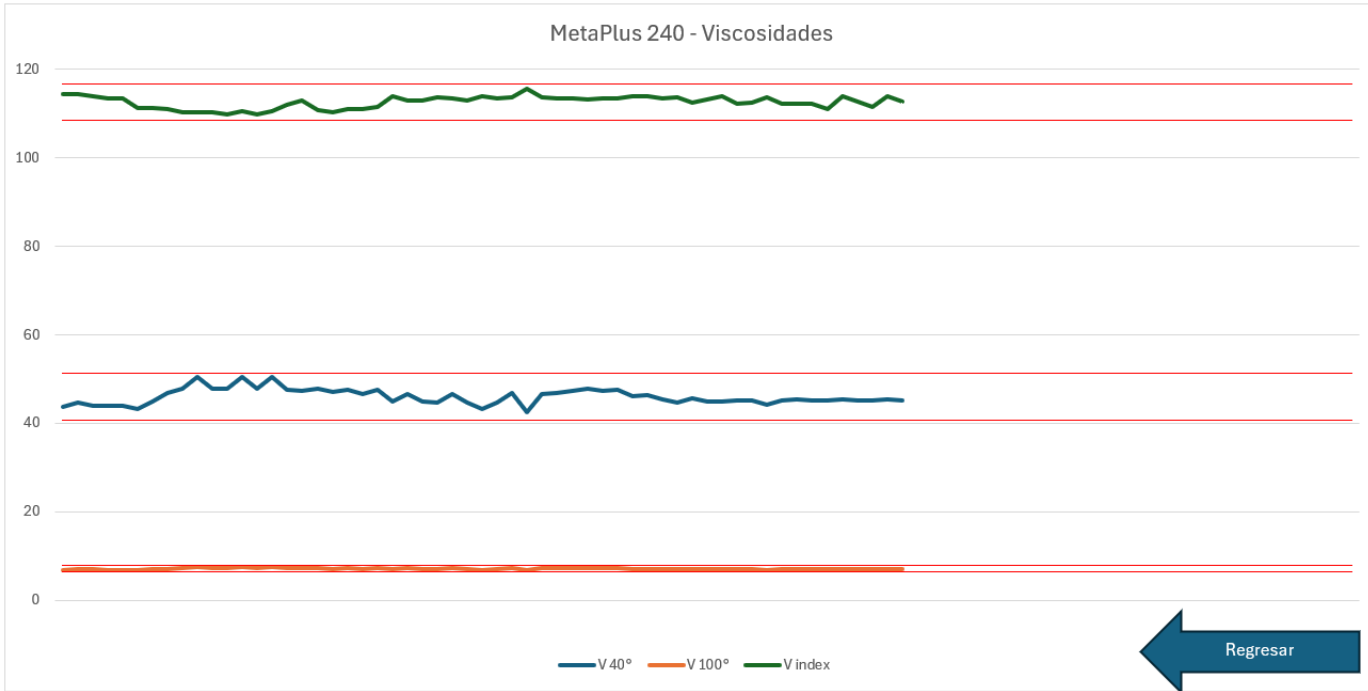
ANEXO 2

Gráficos de control para Vacuum Gas Oil. Datos de enero a diciembre del año 2024.



Índice de viscosidad			
Prom	111.19	Rangos	
Desv	1.69	max	min
3 desv	5.07	116.26	106.12
Viscosidad 40 °C			
Prom	25.52	Rangos	
Desv	1.19	max	min
3 desv	3.57	29.10	21.95
Viscosidad 100 °C			
Prom	4.82	Rangos	
Desv	0.15	max	min
10%	0.48	5.31	4.34





Índice de viscosidad			
Prom	112.60	Rangos	
Desv	1.39	max	min
3 desv	4.17	116.77	108.43
Viscosidad 40 °C			
Prom	45.99	Rangos	
Desv	1.74	max	min
3 desv	5.23	51.23	40.76
Viscosidad 100 °C			
Prom	7.09	Rangos	
Desv	0.17	max	min
10%	0.71	7.80	6.38



Fuente: Gerencia de Calidad y Producto, Empresa Metalub.