

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE LAS AMÉRICAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE
BACHILLERATO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Título de la investigación:

Propuesta de un plan de mantenimiento para los equipos críticos de distribución en Z Gas
Costa Rica

Nombre del estudiante:

Steven Josué Retana Madrigal

Tutor:

Ing. Álvaro Rojas Camacho

Sede Aranjuez

Diciembre, 2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación, en primer lugar, a mi familia, por su apoyo incondicional, paciencia y confianza, los cuales fueron esenciales para mi crecimiento académico y personal.

Asimismo, dedico esta tesis a todas aquellas personas que contribuyeron de manera directa e indirecta a mi formación profesional, brindándome orientación, motivación y enseñanzas valiosas a lo largo de este proceso.

Finalmente, dedico este logro a quienes creen en el esfuerzo, la disciplina y la mejora continua como herramientas fundamentales para el desarrollo profesional y organizacional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por brindarme la salud, la fortaleza y la constancia necesarias para culminar con éxito esta etapa de mi formación académica y profesional.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi tutor de tesis, por su orientación, disposición y valiosos aportes metodológicos y técnicos durante el desarrollo de esta investigación, los cuales fueron fundamentales para el cumplimiento de los objetivos planteados.

De manera especial, agradezco a la empresa donde se desarrolló el presente estudio, por la apertura, colaboración y facilidades brindadas para el acceso a la información, así como por el apoyo recibido durante el proceso de investigación. Su disposición permitió el análisis de la problemática abordada y el desarrollo de una propuesta alineada con la realidad organizacional.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento a los colaboradores de la empresa que, de una u otra forma, aportaron información, tiempo y conocimiento, contribuyendo significativamente a la calidad y viabilidad del trabajo realizado.

Finalmente, agradezco a mi familia y amigos por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante a lo largo de este proceso académico, siendo un pilar fundamental para alcanzar esta meta.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de investigación, titulado “Propuesta de un plan de mantenimiento para los equipos críticos de distribución en Z Gas Costa Rica”, tiene como finalidad diseñar un plan estructurado de mantenimiento preventivo que permita optimizar la gestión técnica y operativa de los equipos involucrados en el proceso de trasiego de gas licuado de petróleo (GLP). La empresa Z Gas Costa Rica, dedicada a la distribución de GLP a nivel nacional, enfrenta actualmente una gestión de mantenimiento predominantemente reactiva, lo que genera altos costos operativos, tiempos prolongados de inactividad y riesgos asociados a la seguridad industrial y ambiental.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo–explicativo, utilizando herramientas de diagnóstico como el análisis de criticidad, el diagrama de Ishikawa y los indicadores técnicos MTBF (tiempo medio entre fallas) y MTTR (tiempo medio para reparar). Se analizaron los equipos críticos: compresores, bombas y motores acoplados, identificando sus fallas más frecuentes y los factores que influyen en su disponibilidad.

Como resultado, se elaboró un plan de mantenimiento preventivo que incluye actividades específicas, responsables, frecuencias, recursos requeridos y parámetros de control para cada equipo. Además, se desarrolló un manual de mantenimiento y un cronograma anual dividido por semanas, diferenciando entre mantenimientos con equipos en operación y paros programados. Se complementó la propuesta con indicadores de desempeño y mecanismos de control que permiten evaluar la efectividad del plan e impulsar la mejora continua.

El análisis económico evidenció la viabilidad financiera del proyecto, demostrando que la inversión en mantenimiento preventivo representa aproximadamente un 29 % del costo de una jornada de inactividad, con un periodo de recuperación estimado en menos de un año. Asimismo, se proyecta una mejora significativa en la disponibilidad operativa y una reducción de fallas no programadas.

En conclusión, la implementación del plan de mantenimiento propuesto fortalecerá la confiabilidad de los equipos críticos, reducirá los costos operativos y garantizará la seguridad en las operaciones de Z Gas Costa Rica. Este proyecto no solo contribuye a la sostenibilidad técnica y económica de la empresa, sino que también promueve una cultura organizacional orientada a la prevención, la eficiencia y la mejora continua.

CONTENIDO

DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTO.....	2
RESUMEN EJECUTIVO	3
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Generalidades de la empresa	12
1.2 Planteamiento del problema	14
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo general	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 Justificación.....	15
1.4.1 Beneficios administrativos	15
1.4.2 Beneficios económicos.....	16
1.4.3 Beneficios legales.....	16
1.4.4 Beneficios operativos	17
1.5 Antecedentes.....	17
1.5.1 Artículos científicos.....	17
1.6 Tesis.....	19
1.7 Proyecciones.....	20
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Conceptos Generales	21
2.1.1 Definiciones relacionadas con el Mantenimiento Industrial	21
2.1.1.2 Estudios de Tiempo	24

2.1.2 Conceptos propios de la Industria	25
2.1.2.1 Equipos críticos en el trasiego de GLP	27
2.1.2.2 Fallas comunes de los equipos críticos en el trasiego de GLP.	29
2.1.2.3 Gestión de inventarios y stock de repuestos en mantenimiento.....	30
2.1.3 Indicadores relacionados	31
2.1.4 Herramientas para la recolección de datos	34
2.1.5 Herramientas de estadística	35
2.2 Herramientas para Describir el Problema	37
2.3 Herramientas para medir las consecuencias.....	39
2.4 Herramientas para analizar las causas	41
2.5 Herramientas para la propuesta	44
2.6 Herramientas para el control de la implementación de la propuesta.....	47
2.6.1 Herramientas para el análisis económico	47
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	51
3.1 Enfoque	51
3.2 Alcance	52
3.3 Diseño.....	53
3.4 Variables	54
3.5 Muestra.....	56
3.6 Instrumentos	57
3.7 Recolección de Datos	58
3.8 Método de Análisis.....	60
3.9 Cronograma.....	61
3.9.1 Diagrama EDT	61

3.9.2 Diagrama de Gantt	62
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL	63
4.1 Descripción del Problema	63
4.1.1 Contexto general del proceso productivo.....	63
4.1.1.1 Inventario de equipos críticos de trasiego de GLP en Z Gas Costa Rica	64
4.1.2 Proceso actual de mantenimiento.....	69
4.1.2.1 Hallazgos identificados	69
4.1.2.2 Fallas identificadas en los equipos críticos	71
4.2 Medición de las consecuencias	73
4.3 Análisis de las causas	76
CAPÍTULO V. PROPUESTA	82
5.1 Propuesta.....	83
5.1.1 Requerimientos para su implementación	83
5.1.2 Fichas técnicas de equipos críticos.....	83
5.1.3 Plan de mantenimiento preventivo.....	87
5.1.4 Manual de mantenimiento	90
5.1.5 Cronograma de mantenimiento	95
5.1.6 Manual de proceso de mantenimiento preventivo.....	98
5.2 Control de la implementación	105
5.2.1 Cronograma Propuesto.....	105
5.2.2 Indicadores de calidad.....	106
Nota: Elaboración propia.	107
5.3 Análisis Económico.....	108
5.3.1 Inversión del proyecto.....	109

5.3.2 Análisis financiero.....	112
5.3.2.1 Retorno de la Inversión	113
5.3.2.2 Periodo de recuperación de la inversión	114
5.3.2.3 Valor Actual Neto (VAN)	115
5.3.2.4 Tasa Interna de Retorno (TIR).....	116
5.3.3 Análisis de fuentes de financiamiento	116
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
6.1 Conclusiones	118
6.2 Recomendaciones.....	119
APÉNDICES.....	122
REFERENCIAS	127
Artículos Científicos	127
Páginas Web	127
Libros	128
Tesis.....	129
TABLAS	
Tabla 1. Equipos críticos de trasiego de GLP	29
Tabla 2. Indicadores y fórmulas de mantenimiento	33
Tabla 3. Estructura de una lista de verificación para mantenimiento.....	35
Tabla 4. Mapa de Procesos de Mantenimiento Correctivo.....	39
Tabla 5. Clasificación de Consecuencias de Fallos en Plantas de Gas.....	41
Tabla 6. Variables	54
Tabla 7. Muestra	57

Tabla 8. Instrumentos	58
Tabla 9. Recolección de Datos	59
Tabla 10. Método de Análisis	60
Tabla 11. Inventario de equipos críticos de trasiego de GLP en Z Gas Costa Rica	65
Tabla 12. Diagrama SIPOC simplificado del proceso de mantenimiento reactivo en Z Gas Costa Rica.....	72
Tabla 13. Clasificación de las consecuencias de una falla de un equipo crítico	75
Tabla 14. Análisis 5W-2H	80
Tabla 15. Plan de Mantenimiento Preventivo	87
Tabla 16. Manual de Mantenimiento.....	91
Tabla 17. Cuadro Control de Mantenimiento.....	107
Tabla 18. Inventario mínimo de repuestos críticos.....	110
Tabla 19. Consumibles mínimos en bodega.....	111
Tabla 20. Recurso humano adicional (ayudante GLP).....	111
Tabla 21. Inversión total del proyecto	112
Tabla 22. Relación costo-beneficio	113
Tabla 23. Opciones de financiamiento	116

FIGURAS

Figura 1. Organigrama Departamento de Operaciones Z Gas Costa Rica.....	13
Figura 2. Fórmula para el cálculo de la disponibilidad.....	22
Figura 3. Componentes del Indicador OEE	34
Figura 4. Histograma.....	36
Figura 5. Diagrama de Pareto.....	37
Figura 6. Diagrama de Flujo	39

Figura 7. Fórmula del RPN	40
Figura 8. Diagrama de Ishikawa	43
Figura 9. Fórmula del Valor Actual Neto (VAN)	48
Figura 10. Fórmula de la Tasa Interna de Retorno (TIR).....	48
Figura 11. Fórmula del payback.....	49
Figura 12. Proceso Cuantitativo.....	52
Figura 13. Diagrama EDT.....	61
Figura 14. Diagrama de Gantt.....	62
Figura 15. Diagrama del proceso productivo de Z Gas Costa Rica	66
Figura 16. Vista Aérea de la Planta del Coyoil de Alajuela.....	68
Figura 17. Muda, Mura y Muri en Z Gas Costa Rica.....	74
Figura 18. Diagrama de Ishikawa	77
Figura 19. Análisis de Pareto.....	78
Figura 20. Fichas Técnicas Equipos Críticos	84
Figura 21. Fichas Técnicas Equipos Críticos	85
Figura 22. Cronograma Mantenimiento con equipos en funcionamiento.....	95
Figura 23. Cronograma Mantenimiento con equipos en funcionamiento.....	96
Figura 24. Cronograma de paros programados	97
Figura 25. Manual de procesos	99
Figura 26. Manual de procesos	100
Figura 27. Manual de procesos	101
Figura 28. Manual de procesos	102
Figura 29. Manual de procesos	103
Figura 30. Cronograma de Implementación.....	106

Figura 31. ROI.....	114
Figura 32. Payback.....	114
Figura 33. Compresor Corken 691	122
Figura 34. Compresor Corken 490.....	122
Figura 35. Bombas Blackmer.....	122
Figura 36. Análisis de Criticidad.....	123
Figura 37. Mantenimiento Compresores Corken	124
Figura 38. Kits de Reparación y Mantenimiento Compresores Corken	124
Figura 39. Kits de Reparación y Mantenimiento Bombas Blackmer.....	125
Figura 40. Detalle de Planta Coyol	125
Figura 41. Cálculo de Cargas Sociales.....	126
Figura 42. Formula del ROI	126

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En la industria energética, la distribución de gas licuado de petróleo (GLP) es una actividad estratégica que requiere altos estándares de seguridad, eficiencia y continuidad. Los equipos utilizados en esta cadena de suministro, especialmente los críticos para el trasiego y almacenamiento deben mantenerse en condiciones óptimas para evitar fallas que puedan interrumpir el servicio y generar riesgos a nivel operativo y ambiental. Por esta razón, el mantenimiento preventivo es una práctica esencial que permite anticipar problemas, reducir costos y mejorar la confiabilidad de los sistemas.

La empresa Z Gas Costa Rica está dedicada a la distribución de GLP y enfrenta retos relacionados con la gestión de mantenimiento de sus equipos críticos. Actualmente, opera mayormente con un mantenimiento reactivo, lo que implica una alta frecuencia de fallos inesperados, tiempos prolongados de reparación y costos elevados. Esta situación influye directamente en la continuidad del servicio y la satisfacción de sus clientes, además de aumentar los riesgos asociados a la seguridad del personal y la integridad de las instalaciones.

Por lo tanto, el objetivo de este proyecto es proponer un plan de mantenimiento preventivo para los equipos críticos de distribución en Z Gas Costa Rica, que permita optimizar los recursos técnicos y humanos, reducir los tiempos de inactividad y asegurar un servicio continuo y seguro. Con esos fines se utilizarán indicadores técnicos como el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y el Tiempo Medio Para Reparar (MTTR), que facilitarán la planificación de las actividades de mantenimiento y el seguimiento de su efectividad.

Esta propuesta responde a la necesidad de la empresa en estudio de adoptar un enfoque sistemático y técnico en la gestión del mantenimiento, lo cual redundará en beneficios tanto operativos como económicos. La implementación del plan mejora la confiabilidad de los equipos y, al mismo tiempo, promueve una cultura organizacional orientada a la prevención, la seguridad y la mejora continua.

La investigación se enmarca en la línea de diseño, desarrollo y mejoramiento de sistemas de mantenimiento industrial, y su alcance comprende el análisis de la situación actual, la formulación de un plan de mantenimiento estructurado para los equipos críticos de distribución y la definición de los recursos necesarios para garantizar su ejecución.

El contenido de los capítulos de este trabajo se organiza de la siguiente manera:

Capítulo I: presenta la introducción al proyecto, describiendo el objetivo general y los específicos, la importancia del plan de mantenimiento para los equipos críticos en Z Gas Costa Rica, las generalidades de la empresa y el planteamiento del problema que motiva esta investigación.

Capítulo II: denominado marco teórico, revisa las bases conceptuales y metodológicas relacionadas con el mantenimiento preventivo, los equipos críticos de distribución de gas, indicadores clave de desempeño como MTBF y MTTR, así como estudios y experiencias previas que respaldan la propuesta.

Capítulo III: Es el marco metodológico con el que se describe el enfoque y las herramientas utilizadas para el análisis del desempeño actual, la recolección de datos sobre fallas y tiempos de inactividad, así como la definición de los criterios para la identificación de equipos críticos.

Capítulo IV: corresponde al análisis de la situación, presentando los resultados del diagnóstico del estado actual del mantenimiento en Z Gas Costa Rica, incluyendo el análisis de historial de fallas, producción y disponibilidad de los equipos.

Capítulo V: acá se desarrolla la propuesta que consiste en el diseño de un plan de mantenimiento preventivo basado en los datos obtenidos durante el análisis de la situación actual. Este plan incluye la definición de un cronograma de actividades, la incorporación de indicadores para el seguimiento, así como la implementación de mecanismos orientados a la mejora continua y al uso eficiente de los recursos.

Finalmente, en el Capítulo VI, se reúnen las conclusiones y recomendaciones, donde se destacan los principales hallazgos del estudio, se analiza el impacto esperado del plan de mantenimiento y se plantean sugerencias para su implementación efectiva en la empresa.

1.1 Generalidades de la empresa

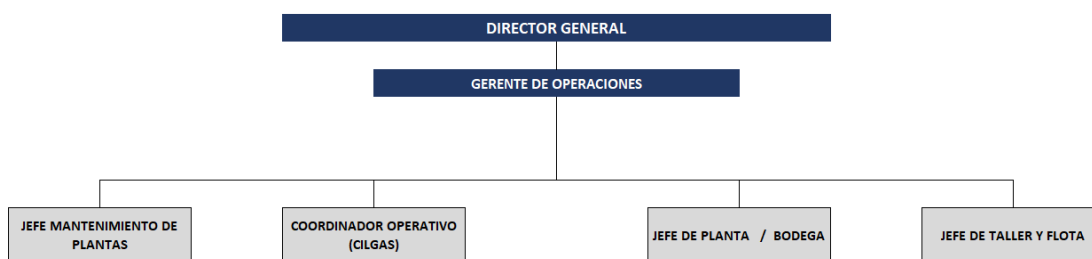
La empresa Z Gas Costa Rica sobresale en el sector energético nacional por su compromiso con la calidad del servicio y el desarrollo de su capital humano. En concordancia con estos principios, su misión institucional se enfoca en garantizar con equidad y buen juicio que los intereses de la empresa se cumplan y el bienestar de los colaboradores se respete. Esto se logra mediante la implementación de una cultura organizacional sólida, que aplica las mejores prácticas y asegura el desarrollo y crecimiento del talento humano. Asimismo, su visión consiste en ser líderes que promuevan y garanticen el desarrollo integral de sus colaboradores, brindándoles una inducción

general y capacitaciones constantes. De esta manera, buscan proporcionar un servicio de excelencia, apegado a las políticas, normas y procedimientos establecidos por la empresa.

La estructura organizacional de Z Gas está compuesta por áreas clave como operaciones, mantenimiento, logística y seguridad industrial, que trabajan en conjunto para garantizar un servicio eficiente.

La empresa se ubica en San José, con varias estaciones de distribución estratégicamente posicionadas para cubrir la demanda en todo el país. Además, cuenta con un equipo técnico especializado responsable del mantenimiento y supervisión de los equipos críticos. A continuación, la figura 1 muestra el organigrama institucional del Departamento de Operaciones, área donde se lleva se implementa la propuesta.

Figura 1. Organigrama Departamento de Operaciones Z Gas Costa Rica.



Nota: Tomado de Z Gas Costa Rica.

Entre los equipos fundamentales para sus operaciones se encuentran los sistemas de trasiego, bombas, válvulas y tanques de almacenamiento, cuya correcta operación es esencial para evitar pérdidas y asegurar la continuidad del suministro. La empresa ha identificado la necesidad de mejorar la gestión del mantenimiento preventivo para estos equipos, con el fin de minimizar fallas que afectan tanto la seguridad como la producción.

Por otro lado, Z Gas Costa Rica también se destaca por su compromiso con las normativas legales vigentes y las mejores prácticas del sector, enfocándose en la seguridad industrial y el cuidado ambiental. La implementación de un plan de mantenimiento preventivo alineado a estos principios es vital para fortalecer su posicionamiento y garantizar la confiabilidad del servicio a largo plazo, lo que asegura beneficios para la empresa en sus operaciones.

1.2 Planteamiento del problema

En Z Gas Costa Rica la gestión actual del mantenimiento de los equipos críticos de distribución requiere fortalecerse para garantizar la continuidad, seguridad y eficiencia en la producción. La dependencia predominante del mantenimiento correctivo genera tiempos prolongados de inactividad, incrementos en los costos operativos y potenciales riesgos para la seguridad de los trabajadores y las instalaciones. Estas limitantes impactan directamente en la confiabilidad del servicio que se ofrece a los clientes.

Los indicadores que la empresa ha utilizado hasta el momento requieren ser adaptados para responder a las exigencias de un mercado cada vez más competitivo. Asimismo, resulta necesario implementar un sistema estructurado de planificación y seguimiento del mantenimiento preventivo, que permita anticipar y mitigar fallas potenciales, optimizar recursos y promover la mejora continua de los procesos.

Por lo tanto, surge la interrogante fundamental que guía esta investigación:

¿Cuál es el plan de mantenimiento preventivo para los equipos críticos de distribución en Z Gas Costa Rica?

Esta pregunta orienta el diseño de una propuesta viable que maximice la disponibilidad operativa de los equipos, reduzca las interrupciones y fortalezca la seguridad en las operaciones de distribución.

El estudio se propone analizar en profundidad los equipos críticos, evaluar el desempeño actual del mantenimiento mediante indicadores clave y diseñar un plan preventivo que asegure la sostenibilidad y la mejora continua del proceso. Con ello, se espera contribuir a la optimización de la gestión de mantenimiento en Z Gas Costa Rica, alineando las actividades con los objetivos estratégicos y la seguridad industrial.

1.3 Objetivos

A continuación, se mencionan los objetivos, tanto general como específicos que se desarrollan en esta investigación:

1.3.1 Objetivo general

Proponer un plan de mantenimiento preventivo para los equipos críticos de distribución en Z Gas Costa Rica.

1.3.2 Objetivos específicos

Describir los equipos críticos en el proceso productivo de distribución de gas LP en Z Gas Costa Rica.

Medir la afectación de las fallas en los equipos críticos sobre la continuidad del servicio y la seguridad operativa.

Analizar las causas de las fallas en los equipos críticos de distribución en Z Gas Costa Rica.

Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo para los equipos críticos de distribución en Z Gas Costa Rica, definiendo para cada actividad su descripción, frecuencia de aplicación, tiempo estimado de ejecución, recursos requeridos y responsabilidades asignadas, con el fin de mejorar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, optimizar el uso de recursos y garantizar la seguridad en los procesos de mantenimiento.

Establecer mecanismos de control mediante indicadores de desempeño, que permitan evaluar la efectividad del plan, realizar seguimiento continuo y promover la mejora continua de los procesos de mantenimiento.

1.4 Justificación

El proyecto de una propuesta de un plan de mantenimiento para los equipos críticos de distribución en Z Gas Costa Rica se fundamenta en la necesidad de abordar desafíos técnicos, financieros y estratégicos que afectan la eficiencia operativa y la competitividad de la empresa en el mercado de distribución de gas.

1.4.1 Beneficios administrativos

La implementación de un plan de mantenimiento permitirá establecer una estructura organizativa clara dentro del área técnica de Z Gas Costa Rica. Dicha estructura incluirá responsabilidades definidas, programación de tareas y uso de herramientas como listas de chequeo, registros de mantenimiento y análisis de criticidad, lo que facilitará el monitoreo y control del proceso de

mantenimiento, asegurando que las tareas se realicen de manera oportuna y sistemática, eliminando la dependencia de acciones reactivas.

Además, al documentar los procesos y crear un historial técnico de cada equipo, se mejora la trazabilidad de las intervenciones y se fortalece la toma de decisiones. Los encargados podrán asignar recursos humanos y materiales con mayor precisión, reduciendo tiempos muertos por falta de planificación. Con esta mejora en la gestión administrativa del mantenimiento se podrá dar un seguimiento más eficaz, generando datos útiles para futuras auditorías, inspecciones o planes de mejora continua.

1.4.2 Beneficios económicos

El principal beneficio económico del plan de mantenimiento preventivo se reflejará en la reducción de costos asociados al mantenimiento correctivo, al minimizar las fallas imprevistas mediante intervenciones planificadas. Los paros no programados en los equipos de distribución generan pérdidas por interrupción del servicio y por el uso adicional de recursos para atender emergencias; con el plan propuesto, estos eventos se anticipan y se optimiza el uso de repuestos y mano de obra técnica.

Al mismo tiempo, se espera una mejora en la eficiencia operativa y en el rendimiento de los equipos, lo que contribuirá a una operación más rentable. La aplicación adecuada del mantenimiento preventivo puede evitar la necesidad de la reposición temprana de equipos costosos, contribuyendo a un uso más eficiente de los activos. En conjunto, estas acciones procuran mejorar el retorno sobre la inversión (ROI) en activos críticos y favorecer una gestión financiera más predecible para la empresa.

1.4.3 Beneficios legales

Z Gas Costa Rica opera en un sector regulado por estrictas normativas de seguridad industrial, transporte y manejo de materiales peligrosos. Un mantenimiento deficiente puede derivar en fallas que representen riesgos para los trabajadores, el entorno y los consumidores, lo cual expone a la empresa a sanciones, multas y cierres temporales. Con este plan, se asegurará que los equipos de trasiego cumplan con estándares técnicos que respalden la operación segura.

El plan también contempla la documentación de las intervenciones y el uso de registros, lo cual facilitará el cumplimiento de los requerimientos legales exigidos por entidades como el Ministerio

de Salud, el Ministerio de Trabajo y el Ministerio de Ambiente y Energía. Es así como mantener evidencia técnica del mantenimiento realizado no solo protege a la empresa ante auditorías, sino que refuerza su compromiso con la seguridad y la sostenibilidad operativa, elementos clave en su reputación empresarial.

1.4.4 Beneficios operativos

En la operación de distribución de gas la confiabilidad de los equipos es vital para mantener el flujo continuo del servicio y evitar retrasos en la entrega del producto. Al identificar los equipos críticos y diseñar un cronograma preventivo, se podrá intervenir con anticipación los sistemas que muestran tendencia a fallar. Esto reducirá los tiempos de inactividad y mejorará el ritmo de producción y distribución, aumentando la capacidad de respuesta ante la demanda del mercado.

El plan también permitirá monitorear indicadores como el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y el Tiempo Medio para Reparar (MTTR), fundamentales para evaluar la efectividad del mantenimiento y detectar áreas de mejora. Estas métricas brindan información clave para realizar ajustes al plan y priorizar acciones en equipos de alto impacto. La mejora operativa se traducirá en una mayor eficiencia interna, menor presión sobre el personal técnico y un servicio más constante para los clientes de Z Gas.

1.5 Antecedentes

En esta sección se examinan las investigaciones realizadas a nivel internacional y nacional, relacionadas con la propuesta de un plan de mantenimiento para los equipos críticos de distribución en Z Gas Costa Rica. Los antecedentes se dividen en artículos científicos, libros y tesis.

1.5.1 Artículos científicos

Arroyo y Obando (2020) en su artículo “Importancia de la implementación de mantenimiento preventivo en las plantas de producción para optimizar procesos”, publicado en E-IDEA Journal of Engineering Science, proponen estrategias de mantenimiento preventivo como medio para mejorar la eficiencia operativa. Aplican herramientas como análisis de fallas, diagrama de Pareto y seguimiento de históricos técnicos. La muestra incluyó plantas de manufactura costarricenses que operan bajo esquemas tradicionales. Entre los resultados se destaca una mejora del 25% en la disponibilidad operativa y una reducción significativa en paros no programados, lo cual valida la efectividad del enfoque preventivo.

Fábregas, Díaz, Medina y Buelvas (2020) publicaron en la Revista Venezolana de Gerencia el estudio llamado “Gerencia del mantenimiento enfocada en la industria de compresión de gas natural”, donde aplican metodologías como RCM, FMEA y gestión por indicadores. Este trabajo recolecta datos a través de registros de mantenimiento y entrevistas técnicas a operadores. Se concluye que una gerencia de mantenimiento bien estructurada permite mejorar la disponibilidad operativa en un 18%, al tiempo que reduce costos asociados a fallos correctivos. El enfoque propuesto muestra un impacto positivo en la estabilidad de los sistemas compresores.

Moreano y Pérez (2020), en el artículo “Plan de mantenimiento preventivo para la mejora del índice de falla de un sistema de transporte neumático”, publicado en Dominio de las Ciencias, proponen un cronograma técnico basado en indicadores como MTBF y MTTR. En este caso, se utilizó una planta de transporte neumático como caso de estudio, y los datos se obtuvieron a través de inspecciones, historiales técnicos y entrevistas. El resultado fue una disminución del 40% en la tasa de fallas y una mejora en la planificación de recursos técnicos. El estudio enfatiza la importancia de un mantenimiento sistemático y calendarizado.

Rodríguez (2020), en su publicación “Tipos de mantenimiento en las plantas compresoras de gas del Municipio Simón Bolívar” en la revista DataCiencia, elabora un análisis comparativo entre mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo. Utiliza datos históricos, encuestas a técnicos de planta y análisis de tiempos muertos. La investigación evidencia que la implementación combinada de mantenimiento preventivo y predictivo mejora la disponibilidad de los equipos hasta un 85%. Además, se identificó una reducción significativa en los costos por paradas inesperadas. El estudio valida la necesidad de estrategias mixtas en contextos industriales complejos.

Ronceros y Pomblas (2023), en su artículo “Modelo de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad Operacional para una Planta Compresora de Gas”, publicado en la Revista Politécnica, aplican el modelo RAM para diagnosticar la eficiencia técnica en sistemas de compresión. La metodología incluyó simulaciones por software, análisis estadístico de tiempos de reparación y registros históricos. El modelo permitió elevar la confiabilidad operativa en un 22% y reducir el tiempo medio de reparación en un 30%. Este enfoque demuestra ser eficaz para la toma de decisiones técnicas en plantas de alta exigencia operativa.

1.6 Tesis

Alvarado, Rodríguez y Soto (2024), plantearon el trabajo titulado “Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la empresa Na Lakalú” en la Universidad de Costa Rica, para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Industrial. Aplicaron matrices de criticidad, diagramas de flujo, hojas de inspección y cronogramas calendarizados e hicieron la recolección por medio de la observación directa e historial de mantenimiento. El resultado, fue una reducción del 20 % en tiempos de inactividad de equipos.

Porras y López (2023), presentaron el trabajo denominado “Rediseño del plan de mantenimiento para el área de Ingeniería y Mantenimiento del Hospital Carlos Luis Valverde Vega” para la Universidad de Costa Rica para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería industrial. Emplearon el análisis causa-raíz, CMMS y mapas de procesos, recolectando los datos vía entrevistas técnicas y revisión documental. El resultado fue la mejora de la disponibilidad de equipos médicos en un 18 % y se redujeron los tiempos de respuesta del mantenimiento correctivo.

Brenes (2022) elaboró la tesis titulada “Proceso para la mejora del plan de mantenimiento preventivo y confección de un procedimiento de mantenimiento de edificaciones para las instalaciones de Paradise Ingredients” en el Instituto Tecnológico de Costa Rica para optar por el grado de licenciatura en ingeniería en Mantenimiento Industrial. Utilizaron inspecciones programadas, diagramas de flujo, evaluación de condiciones y bitácoras. En la recolección de los datos emplearon bitácoras y revisiones periódicas. El resultado fue una reducción de tiempos de reparación y fallos imprevistos, con un aumento en la eficiencia operativa.

Contreras (2023) presentó el trabajo “Propuesta de mejora financiera en el sistema de costos de mantenimiento para incrementar la rentabilidad de este servicio en un complejo turístico en Costa Rica” en la Universidad de Costa Rica para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Industrial. Se emplearon herramientas de ingeniería económica, análisis de costos y modelo ABC, con datos recolectados de estados financieros y entrevistas al encargado de mantenimiento. Como resultado se planteó la proyección de un incremento del 12 % anual en la rentabilidad del servicio.

Araya, Jara, y Pastrana (2020) elaboraron el documento titulado “Diseño de un plan estratégico de mantenimiento basado en la filosofía TPM, para el área de planta de complejos en la empresa FERTICA S.A.” en la Universidad Técnica Nacional para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Industrial. Aplicaron TPM, pilares de mantenimiento autónomo, AMEF y diagramas de

flujo, con una recopilación de datos por medio de la observación participativa y documentación. El resultado consistió en un incremento del 25 % en disponibilidad de la planta.

1.7 Proyecciones

Se espera que el diseño e implementación del plan de mantenimiento en Z Gas permitirá mejorar significativamente la disponibilidad operativa de los equipos críticos. Al utilizar indicadores como MTBF y MTTR se podrá obtener una lectura clara de la confiabilidad técnica, facilitando acciones correctivas anticipadas, lo que fortalecerá la continuidad de las operaciones y reducirá el riesgo de interrupciones en la distribución.

A partir de los antecedentes analizados, se proyecta que la implementación de cronogramas de mantenimiento preventivo podría contribuir a una disminución del índice de fallas, al organizar de manera sistemática las intervenciones en los equipos críticos. Estos planes se diseñarían tomando en cuenta el historial técnico de los equipos, lo cual se espera que mejore la eficiencia operativa y reduzca la dependencia del mantenimiento correctivo. De esta manera, se anticipa una optimización en la estabilidad del servicio.

El proyecto contempla también el desarrollo de mecanismos de monitoreo y evaluación que acompañen la implementación del plan, incluyendo reportes periódicos de desempeño técnico y evaluaciones de efectividad. Se prevé que con estas herramientas la empresa obtenga información clave para realizar ajustes y mejoras continuas en su estrategia de mantenimiento.

Finalmente, se espera lograr beneficios adicionales tales como el fortalecimiento del conocimiento técnico del personal de mantenimiento, una reducción en los costos operativos derivados de fallos, y un aumento en la seguridad operativa de la empresa, factores que contribuirán al posicionamiento competitivo y la sostenibilidad de Z Gas en el sector energético.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrolla el marco teórico necesario para sustentar la propuesta de un plan de mantenimiento preventivo aplicado a los equipos críticos del sistema de distribución en Z Gas Costa Rica. Este marco se fundamenta en conceptos generales relacionados con el mantenimiento industrial, así como en normas, indicadores técnicos y herramientas específicas que permitirán describir el problema, medir sus consecuencias, analizar sus causas, diseñar soluciones y controlar su implementación. A través de este enfoque estructurado, se busca construir una base teórica sólida que respalde el desarrollo de estrategias técnicas eficaces para mejorar la confiabilidad, disponibilidad y seguridad operativa de los activos involucrados.

2.1 Conceptos Generales

Este apartado se basa en conceptos generales de mantenimiento industrial, normas técnicas aplicables, indicadores de gestión y herramientas específicas que permiten describir el problema, medir sus consecuencias, analizar sus causas, diseñar soluciones y controlar su implementación.

2.1.1 Definiciones relacionadas con el Mantenimiento Industrial

El mantenimiento preventivo es el conjunto de actividades técnicas, sistemáticas y programadas que se ejecutan de forma anticipada para prevenir fallas o deterioros en los equipos industriales. Su propósito fundamental es preservar la funcionalidad de los activos mediante revisiones periódicas, ajustes, limpieza, lubricación y reemplazo de piezas según el criterio del fabricante o el análisis de datos históricos. Este tipo de mantenimiento contribuye directamente a reducir el tiempo de inactividad, aumentar la productividad y prolongar la vida útil de los equipos (Mobley, 2014). Por su parte, Heizer y Render (2014) destacan que “el mantenimiento preventivo es fundamental para mejorar la eficiencia operativa y la disponibilidad de los equipos industriales (p. 91)”.

Además, el mantenimiento preventivo permite estandarizar rutinas de revisión que mejoran la trazabilidad de las intervenciones técnicas y la planificación de recursos. Esta estandarización también facilita la capacitación del personal técnico y reduce la variabilidad en los procedimientos operativos. Heizer y Render (2014) subrayan que “al reducir las fallas inesperadas, se minimizan también los riesgos operativos y ambientales, especialmente en sectores como el gasífero, donde la seguridad es crítica” (p. 91). Por ello, la implementación de un plan preventivo bien estructurado se convierte en una estrategia organizacional para mantener la continuidad operativa.

A su vez, la inversión en mantenimiento preventivo genera beneficios económicos a largo plazo al disminuir los costos asociados a fallas graves, reparaciones correctivas no planificadas y pérdida de producción. Esta inversión puede ser justificada mediante indicadores de desempeño como el MTTR (Mean Time to Repair), el MTBF (Mean Time Between Failures) y el OEE (Overall Equipment Effectiveness), los cuales permiten cuantificar el rendimiento de los equipos (Mobley, 2014).

Según Mobley (2014), “el mantenimiento preventivo bien planificado reduce el número de paradas no programadas y mejora el uso de los recursos técnicos y financieros” (p. 84). De esta manera, las organizaciones que aplican programas sistemáticos logran ventajas competitivas al elevar su eficiencia técnica y operativa.

La disponibilidad es un indicador clave que mide el porcentaje de tiempo en que un equipo o sistema se encuentra operando correctamente respecto al tiempo total en que debería estar disponible. Este parámetro resulta esencial para evaluar tanto la confiabilidad de los equipos como la eficacia del sistema de mantenimiento. De acuerdo con Vilardell (2022), “una alta disponibilidad indica que los equipos están en condiciones óptimas para cumplir con sus funciones, lo cual tiene un impacto directo sobre la productividad y la seguridad operativa” (p. 63). Este indicador permite tomar decisiones estratégicas sobre planificación de recursos, programación de mantenimientos y mejora continua en sistemas de alta exigencia como los de trasiego y distribución de gas LP.

La figura 2 muestra la fórmula utilizada para calcular la disponibilidad de los equipos industriales que relaciona el tiempo en que un equipo está operando correctamente con respecto al tiempo total disponible.

Figura 2. Fórmula para el cálculo de la disponibilidad

$$Disponibilidad = \frac{\text{Tiempo operativo}}{(\text{Tiempo operativo} + \text{Tiempo de paro})}$$

Nota: Tomado de *Maintenance engineering handbook*.

Esta fórmula permite realizar un análisis cuantitativo del impacto del mantenimiento sobre la disponibilidad de los activos. Mediante su aplicación, se pueden identificar cuellos de botella, justificar inversiones en equipos de respaldo y diseñar planes de mejora continua para aumentar el tiempo efectivo de operación. Mobley (2014) indica que “la disponibilidad es uno de los

indicadores más importantes para evaluar el desempeño del mantenimiento, ya que refleja la eficiencia con la que se mantienen los equipos operativos dentro de los estándares de confiabilidad establecidos” (p. 6).

Es importante señalar que la disponibilidad se ve afectada por múltiples factores como la frecuencia de fallas, el tiempo de respuesta del personal técnico, la eficiencia en la cadena de suministros de repuestos, y la cultura organizacional orientada a la mejora continua. Por ello, no debe analizarse de forma aislada, sino en conjunto con otros indicadores que permitan una visión integral del desempeño del sistema (Montilla, 2019).

La confiabilidad se refiere a la probabilidad de que un equipo cumpla con su función prevista bajo condiciones establecidas durante un período determinado. En términos prácticos, implica que un componente opere sin fallas dentro de un rango de tiempo, manteniendo los estándares de desempeño requeridos. Mencionan Montgomery y Runger (2018) que “la confiabilidad es un componente crítico en sistemas de alta exigencia técnica, especialmente en procesos continuos donde las interrupciones generan pérdidas significativas” (p. 144).

El análisis de confiabilidad requiere la aplicación de herramientas estadísticas que permitan estudiar la frecuencia y causa de fallas, como el análisis Weibull o la función de tasa de fallos. Estas herramientas son fundamentales para establecer intervalos óptimos de mantenimiento preventivo, definir políticas de reemplazo y diseñar programas predictivos que respondan al comportamiento real del equipo. Heizer y Render (2014) explican que “aumentar la confiabilidad implica disminuir la variabilidad de los procesos, lo cual mejora la calidad del producto final” (p. 88).

Además, un sistema confiable incrementa la satisfacción del cliente interno y externo al asegurar entregas a tiempo, reducir rechazos por fallas técnicas y minimizar la necesidad de reprocesos. En el ámbito del mantenimiento, la confiabilidad se convierte en una meta estratégica que orienta la planificación técnica y la asignación de recursos, contribuyendo a una operación más eficiente y rentable.

Los equipos críticos son aquellos cuya falla puede afectar de forma significativa la continuidad operativa, la seguridad del personal, el medio ambiente o la calidad del producto o servicio. La identificación de estos equipos es esencial para asignar recursos de mantenimiento de manera prioritaria y estratégica. Por su parte, Heizer y Render (2014) destacan que estos equipos “deben priorizarse en los planes de mantenimiento para evitar consecuencias adversas” (p. 91).

La criticidad de un equipo se evalúa mediante criterios como el impacto de su falla en el proceso productivo, la frecuencia con la que presenta fallas, los costos asociados a su reparación y el tiempo requerido para su reemplazo o recuperación, que pueden ser evaluados a través de metodologías como el análisis de modo y efecto de falla (FMEA) o la matriz de criticidad, que permiten jerarquizar equipos y establecer programas de mantenimiento diferenciados (Vilardell, 2022).

Es claro que asignar mayor atención a los equipos críticos mediante mantenimiento preventivo, disponibilidad de repuestos y personal capacitado permite mitigar riesgos operativos, reducir tiempos muertos y cumplir con normativas legales de seguridad industrial. Montilla (2019) enfatiza que “una gestión eficaz del mantenimiento incluye estrategias diferenciadas para los activos más críticos, garantizando su operatividad y confiabilidad” (p. 104).

El sistema de distribución de gas está compuesto por una serie de equipos interconectados que permiten el transporte seguro y eficiente del gas desde los puntos de almacenamiento hasta el consumidor final. Entre los principales componentes se encuentran compresores, bombas, válvulas de control, tuberías, motores eléctricos y dispositivos de monitoreo como sensores de presión y temperatura. Montilla (2019) explica que “la eficiencia de estos sistemas depende del estado operativo de cada componente y de su correcta integración dentro del proceso” (p. 115).

Este tipo de sistemas operan bajo condiciones específicas de presión y caudal, lo cual requiere una supervisión constante y planes de mantenimiento bien estructurados. Una falla en cualquiera de sus componentes puede generar paros en la operación, pérdidas económicas significativas e incluso riesgos a la seguridad de las personas o al medio ambiente. De ahí que es fundamental implementar tecnologías como sistemas SCADA que permitan monitorear en tiempo real el funcionamiento del sistema y activar protocolos de mantenimiento correctivo o preventivo.

La operación continua y segura del sistema de distribución depende en gran medida de la capacidad del área de mantenimiento para garantizar que cada componente funcione dentro de sus parámetros de diseño. En este contexto, el plan de mantenimiento preventivo cobra especial relevancia como mecanismo para asegurar la disponibilidad, confiabilidad y seguridad de la infraestructura operativa de la empresa.

2.1.1.2 Estudios de Tiempo

La implementación de estudios de tiempo constituye un elemento primordial para estandarizar las actividades de mantenimiento y mejorar la planificación operativa. Heizer y Render (2014)

explican que el estudio clásico de tiempos, originado por Taylor, es “el método más utilizado para medir el desempeño real de una tarea y establecer tiempos estándar confiables” (p. 414).

Los citados autores describen un procedimiento de ocho pasos que inicia con la definición precisa de la tarea, la descomposición en elementos y la determinación del número adecuado de ciclos por medir (Heizer y Render, 2014, pp. 414–415). Esta estructura ayuda a capturar la variabilidad natural del proceso y evita sesgos en la medición.

Otro aporte relevante es el cálculo del tiempo normal, resultado de multiplicar el tiempo observado promedio por el factor de calificación que ajusta el desempeño del trabajador (Heizer & Render, 2014, p. 415). Esta corrección es indispensable cuando se desea obtener tiempos consistentes y comparables entre diferentes operarios.

Se suma que el tiempo estándar incorpora holguras destinadas a necesidades personales, fatiga y demoras inevitables. Heizer y Render (2014) señalan que “estas holguras suelen ubicarse entre el 4 % y el 7 %, dependiendo de la complejidad de la tarea y las condiciones del entorno” (pp. 415–416). Por eso incluir estos factores permitiría generar expectativas realistas y evitar sobrecargas laborales, especialmente en actividades con exposición a condiciones ambientales adversas o esfuerzos repetitivos.

De ese modo, se enfatiza la relevancia de determinar el tamaño de muestra adecuado para garantizar la precisión estadística en los tiempos estándar. Este cálculo depende del nivel de confianza deseado, la variabilidad observada y la precisión requerida (Heizer & Render, 2014, p. 417).

2.1.2 Conceptos propios de la Industria

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) es una mezcla de hidrocarburos ligeros, principalmente propano y butano, que se almacena en estado líquido bajo presión. Es un combustible ampliamente utilizado en aplicaciones industriales, comerciales y domésticas debido a su alta eficiencia energética y facilidad de transporte. Según la Asociación Iberoamericana de Gas Licuado [AIGLP] (2020), “el GLP es incoloro e inodoro en su estado natural, por lo que se le adiciona etil mercaptano como odorante para facilitar su detección en caso de fugas” (p. 15). Esta sustancia permite identificar la presencia de gas en concentraciones tan bajas como el 20 % del límite inferior de inflamabilidad.

Las propiedades fisicoquímicas del GLP hacen que su manejo requiera estrictas condiciones de seguridad. Tiene una densidad de vapor mayor a la del aire, lo que provoca que las fugas tiendan a

acumularse en zonas bajas. Además, posee una alta inflamabilidad y una relación de expansión de gas a líquido de 270:1, lo que significa que una pequeña cantidad de líquido puede generar un gran volumen de vapor inflamable. La temperatura de autoignición del propano ronda los 450 °C, y su punto de ebullición se encuentra en -42 °C, lo que permite su licuefacción a presiones moderadas (NFPA, 2020, p. 17). Dichas características justifican la necesidad de controles técnicos rigurosos en toda la cadena de distribución.

El proceso de odorización es clave para la seguridad industrial, ya que permite detectar fugas antes de que el gas alcance concentraciones peligrosas. La NFPA 58:2020 establece que el GLP debe ser odorado de manera uniforme con compuestos como el etil mercaptano, en una proporción mínima que garantice su detección por el olfato humano. Esta norma también regula las frecuencias de inspección de válvulas, mangueras, compresores y sistemas de alivio de presión. Además, establece la obligación de contar con dispositivos de corte de emergencia, bitácoras de mantenimiento y personal capacitado en cada estación de trasiego (NFPA, 2020, pp. 103–109).

Los recipientes que almacenan GLP deben cumplir con el Código ASME, sección VIII, división 1, el cual regula el diseño, fabricación e inspección de recipientes a presión. Esta norma exige pruebas hidrostáticas, materiales certificados, válvulas de alivio calibradas, procedimientos de soldadura calificados y espesores de pared determinados por cálculos de presión interna (ASME, 2021). El cumplimiento de este código asegura la integridad estructural de los tanques estacionarios y cisternas, reduciendo el riesgo de explosiones o fugas por debilitamiento del material.

El mantenimiento en plantas de trasiego de gas debe contemplar no solo aspectos operativos, sino también criterios de confiabilidad, riesgos y criticidad de los activos. La ISO 14224:2016 proporciona un marco metodológico para recolectar y analizar datos de fallas, frecuencia de mantenimiento, tiempos de reparación y disponibilidad de equipos. Esto permite priorizar los componentes más críticos como bombas de trasiego, válvulas de alivio, compresores, líneas de carga y motores eléctricos (ISO, 2016). Estos equipos deben mantenerse en condiciones óptimas, ya que una falla podría comprometer la operación completa de la planta.

De igual forma, la norma ISO 55000:2014 establece lineamientos para la gestión estratégica de activos físicos durante todo su ciclo de vida. En el caso del sector gas, su aplicación permite desarrollar planes de mantenimiento basados en riesgos, alineados con objetivos de seguridad, eficiencia y sostenibilidad. Montilla (2019) indica que “en plantas de alto riesgo, como las de gas

LP, el mantenimiento debe estar fundamentado en criterios técnicos y económicos para evitar paradas críticas” (p. 110). En ese sentido, se optimiza el uso de recursos y se reduce la posibilidad de eventos mayores.

En Costa Rica, el Reglamento para el Transporte, Almacenamiento y Distribución de GLP del MINAE (2021) obliga a las empresas a implementar un sistema de mantenimiento documentado, revisiones periódicas, inspecciones de integridad estructural y capacitación constante del personal técnico. Dicho reglamento se alinea con las normativas internacionales como la NFPA 58 e ISO 14224, reforzando un enfoque preventivo y normativo para garantizar la seguridad del sistema de distribución. El incumplimiento de estas disposiciones puede generar sanciones administrativas a las empresas y poner en riesgo a la población circunvecina.

2.1.2.1 Equipos críticos en el trasiego de GLP

En la industria del gas licuado de petróleo (GLP), los equipos críticos son aquellos activos cuya operatividad es indispensable para mantener la continuidad, seguridad y eficiencia del proceso de distribución. Su relevancia se determina no solo por el valor económico, sino por el grado de impacto que su falla tendría sobre la producción, la seguridad de los trabajadores, el entorno y la satisfacción del cliente. El concepto de criticidad está estrechamente ligado a la confiabilidad operacional, ya que estos equipos suelen estar expuestos a condiciones exigentes de presión, temperatura y manipulación de sustancias inflamables.

Según Montilla (2019), “los equipos críticos deben ser priorizados en el plan de mantenimiento debido al impacto que su falla tendría sobre la continuidad del servicio y la seguridad del sistema” (p. 102). Por ello, su identificación y monitoreo sistemático se convierten en pilares fundamentales en cualquier plan de mantenimiento industrial.

Entre los principales equipos críticos en una planta de distribución de GLP se encuentran los compresores y las bombas de trasiego, los cuales permiten mover el gas entre los diferentes puntos del sistema, ya sea en fase gaseosa o líquida. Estos equipos requieren un funcionamiento continuo, y su parada puede generar cuellos de botella en la operación, afectando la cadena de suministro. También destacan los motores eléctricos que alimentan estos sistemas, cuya función es transformar la energía eléctrica en energía mecánica para impulsar los procesos de trasiego. La criticidad de estos motores se acentúa en sistemas automatizados o con requerimientos de funcionamiento continuo.

A su vez, las válvulas de control y seguridad desempeñan un papel esencial al regular la presión interna de las tuberías y evitar sobrecargas que podrían derivar en explosiones o fugas. Los compresores, bombas, válvulas de control y sistemas de monitoreo son considerados equipos críticos en plantas de trasiego de GLP debido a su impacto en la seguridad y continuidad operativa (Nahmias y Lennon, 2015, p. 210).

Un componente no menos importante son los instrumentos de medición y control, como sensores de presión, temperatura y caudal. Su correcta calibración y funcionamiento son necesarios para garantizar que el sistema opere dentro de los parámetros seguros definidos por normativas como la NFPA 58 (2020), que establece los requisitos de diseño y mantenimiento para instalaciones que manipulan GLP. La norma recomienda la instalación de dispositivos de seguridad como válvulas de alivio, detectores de fugas y sistemas de paro automático ante eventos anormales (NFPA, 2020, Sección 6.8.2).

El uso de herramientas como el Análisis de Criticidad o el FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) permite establecer una jerarquía de equipos según el riesgo asociado a su falla, combinando criterios de severidad, frecuencia y detectabilidad. De esa forma, el mantenimiento preventivo y predictivo puede enfocarse en estos activos prioritarios, asegurando disponibilidad operativa y reduciendo costos de intervención no planificada. En este contexto, la ISO 55000 recomienda la gestión de activos basada en riesgo como una práctica clave para garantizar la generación de valor y sostenibilidad del sistema productivo (ISO, 2014). Por lo tanto, definir con claridad los equipos críticos dentro del sistema de distribución de gas permite planificar de forma eficiente y fundamentada, enfocando los recursos disponibles hacia los puntos que más lo requieren.

A continuación, se muestra la tabla 1 con la descripción de los equipos principales en una planta de trasiego de GLP, sus funciones y consecuencias ante una falla:

Tabla 1. Equipos críticos de trasiego de GLP

Equipo	Función Principal	Criticidad	Consecuencia de Falla
Compresores Corkner	Transferencia de GLP entre tanques	Alta	Parada total del trasiego
Motores Westinghouse	Accionamiento eléctrico del compresor	Alta	Interrupción del suministro
Bombas Blackmer	Bombeo de gas desde tanque a llenado	Media	Disminución de flujo operativo

Nota: Elaboración propia con base en manuales técnicos y visitas de campo (2025).

2.1.2.2 Fallas comunes de los equipos críticos en el trasiego de GLP.

El análisis de fallas en los equipos críticos de distribución de GLP permite identificar patrones recurrentes, prevenir interrupciones operativas y tomar decisiones informadas en la planificación del mantenimiento. En el sector del gas, estas fallas no solo tienen implicaciones económicas, sino que también representan riesgos significativos en términos de seguridad industrial y cumplimiento normativo. Por esa razón, resulta imprescindible clasificar y comprender los tipos de fallas más comunes para establecer estrategias de intervención adecuadas (ISO 14224, 2016).

En el caso de los compresores, algunas de las fallas más frecuentes incluyen el sobrecalentamiento, generalmente ocasionado por deficiencias en la lubricación o por obstrucciones en el sistema de enfriamiento. También son comunes las fugas de aceite o gas por desgaste de sellos, así como el desbalance o desalineación de ejes, lo que genera vibraciones excesivas y puede llevar a la rotura de componentes internos. Estas fallas afectan directamente la eficiencia del trasiego y pueden comprometer la seguridad si no son detectadas a tiempo. Señala Montilla (2019), que “el mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones y monitoreo de temperatura es una de las mejores prácticas para anticiparse a estos eventos” (p. 110).

Las bombas de trasiego, por su parte, presentan fallas por cavitación, que ocurre cuando se forman burbujas de vapor dentro del fluido por condiciones de baja presión, provocando golpes internos que deterioran los componentes. Además, pueden presentar fugas en los sellos mecánicos, desgaste de los rodamientos, y obstrucciones por partículas sólidas presentes en el gas. Estas fallas afectan la continuidad del flujo y pueden causar detenciones prolongadas si no se cuenta con repuestos disponibles.

Los motores eléctricos presentan un conjunto de fallas típicas como sobrecalentamiento por sobrecarga, fallas en el aislamiento de los bobinados, pérdida de fases o cortocircuitos por acumulación de humedad o polvo conductor. Este tipo de fallas, si no son atendidas a tiempo, puede causar incendios o paros totales en la planta. De acuerdo con la norma NFPA 58 (2020), todo equipo eléctrico en contacto con gas inflamable debe cumplir con los estándares de seguridad para atmósferas explosivas (NFPA, 2020, Sección 6.22.4).

En cuanto a las válvulas de control y seguridad, los problemas más comunes incluyen corrosión interna por exposición a humedad, fallas en los actuadores neumáticos o eléctricos, y obstrucción por residuos sólidos. Dichas fallas pueden impedir el cierre adecuado ante sobrepresión, generando riesgos críticos. Por ello, se recomienda realizar pruebas periódicas de funcionamiento conforme a las buenas prácticas de mantenimiento establecidas en la norma ISO 14224 (ISO, 2016).

Cabe destacar que no debe ignorarse la ocurrencia de fallas humanas, como errores en la configuración de parámetros, mantenimiento inadecuado o mala interpretación de alarmas. Estas fallas suelen ser subestimadas, pero tienen una alta incidencia en accidentes operativos. De ahí la importancia de capacitar al personal técnico y documentar de forma rigurosa todos los procedimientos operativos. “El análisis de modos y efectos de falla facilita la priorización de acciones preventivas que incrementan la confiabilidad y reducen los tiempos muertos” (Nahmias y Lennon, 2015, p. 215).

2.1.2.3 Gestión de inventarios y stock de repuestos en mantenimiento

La gestión adecuada del inventario de repuestos es fundamental para garantizar la continuidad operativa de los equipos críticos utilizados en el trasiego de GLP. Según Nahmias y Lennon (2015), “los inventarios en entornos industriales se clasifican según su grado de valor agregado, abarcando materias primas, componentes, productos en proceso y artículos terminados” (p. 201). Esta categorización permite a las organizaciones identificar el tipo de existencias que requieren protección estratégica, lo cual es particularmente relevante en operaciones donde las fallas mecánicas pueden generar interrupciones significativas o riesgos de seguridad.

En el contexto del mantenimiento industrial, los repuestos pertenecen a la categoría de componentes o work-in-process debido a que aún no completan su ciclo funcional y permanecen en espera de ser utilizados (Nahmias & Lennon, 2015, p. 201). De ahí que mantener niveles adecuados de estos insumos constituye un indicador de eficiencia del sistema de programación de

mantenimiento, ya que una falta de disponibilidad puede provocar retrasos, tiempos muertos o intervenciones correctivas de mayor costo. En ese tanto, los citados autores enfatizan que los inventarios sirven como amortiguadores entre la demanda técnica del sistema y las limitaciones operativas de abastecimiento.

Asimismo, Nahmias y Lennon (2015) justifican “la tenencia de inventarios a partir de factores como economías de escala, incertidumbre y tiempos de entrega” (pp. 202–203). En el caso específico del GLP, la incertidumbre en la ocurrencia de fallas, combinada con la variabilidad en los tiempos de reposición de repuestos importados, obliga a mantener existencias de seguridad que permitan responder oportunamente a eventos no programados. La variabilidad del lead time, definida como el tiempo entre realizar un pedido y recibirlo, demanda que las organizaciones conserven inventario disponible aun cuando la demanda futura pueda estimarse con precisión.

Otro elemento relevante identificado por los mismos autores es la función del inventario como mecanismo de protección frente a incertidumbres en el suministro, incluyendo fallas de proveedores, fluctuaciones de precios o interrupciones logísticas (Nahmias & Lennon, 2015, p. 203). En industrias energéticas, donde la continuidad operacional es prioritaria y los repuestos suelen tener procedencia internacional, estas incertidumbres incrementan el riesgo de desabastecimiento si no existe un stock mínimo definido. La acumulación estratégica de ciertos repuestos garantiza la resiliencia operativa y minimiza el impacto financiero derivado de paros no planificados.

Finalmente, Nahmias y Lennon (2015) explican que “los sistemas de inventario poseen características que influyen directamente en la toma de decisiones, tales como la variabilidad de la demanda, el tiempo de revisión del inventario y los costos de control asociados” (pp. 203–204).

2.1.3 Indicadores relacionados

La medición del desempeño en el mantenimiento industrial es un componente determinante para la gestión eficiente de los activos, ya que permite evaluar la efectividad de las estrategias implementadas y orientar la mejora continua. Para ello, se utilizan indicadores técnicos que reflejan aspectos clave como la confiabilidad, la capacidad de respuesta y la disponibilidad operativa de los equipos críticos. Estos indicadores son fundamentales para asegurar que los recursos destinados al mantenimiento generen el mayor valor posible, optimizando tanto la productividad como la seguridad (Montilla, 2019).

Uno de los indicadores más utilizados es el MTBF (Mean Time Between Failures), que representa el tiempo promedio que transcurre entre fallas consecutivas de un equipo. Un MTBF elevado indica una alta confiabilidad, lo cual es deseable en sistemas industriales donde la interrupción afecta directamente la producción y la seguridad. De acuerdo con Mobley (2014), “el cálculo del MTBF permite evaluar la estabilidad del sistema y planificar con precisión las tareas de mantenimiento preventivo” (p. 92). Por ejemplo, en el sector del gas, un compresor con un MTBF prolongado reduce el riesgo de paradas imprevistas, lo que contribuye directamente a la estabilidad operativa y a la continuidad del suministro.

El MTTR (Mean Time To Repair) mide el tiempo promedio requerido para reparar un equipo y devolverlo a condiciones operativas normales. Este indicador es primordial en la gestión de mantenimiento porque refleja la capacidad de respuesta del equipo técnico frente a una falla. Un MTTR bajo significa menor tiempo de inactividad y mayor eficiencia operacional. Según Montgomery y Runger (2018), "la reducción del tiempo de reparación es un factor esencial para la mejora continua del sistema, ya que permite una rápida restauración del servicio" (p. 152). En el contexto de distribución de gas, minimizar este tiempo evita interrupciones críticas en el suministro.

La Disponibilidad Operativa combina el MTBF (tiempo medio entre fallas) y el MTTR para representar el porcentaje de tiempo efectivo en que un equipo está disponible respecto al total. Este indicador permite dimensionar el rendimiento real de los activos y fundamentar decisiones sobre redundancia, planificación y recursos técnicos. La norma ISO 14224 (2016) establece que “la disponibilidad se utiliza para evaluar el comportamiento operativo de los activos en industrias de proceso continuo, como petróleo y gas, donde las fallas pueden tener consecuencias críticas” (p. 18). Su monitoreo constante es vital para priorizar mantenimientos preventivos y mejorar la confiabilidad general del sistema. Previamente, en la figura 2 se mostró la fórmula utilizada para calcular la disponibilidad de los equipos industriales

La correcta interpretación y aplicación de estos indicadores requiere de una metodología rigurosa para la recolección y análisis de datos. La norma ISO 55000 recomienda la implementación de sistemas de gestión de activos que incluyan el monitoreo continuo y análisis de estos indicadores, con el fin de optimizar el ciclo de vida de los equipos y mejorar la eficiencia operativa (ISO, 2014, párr. 8).

El análisis estadístico complementa el uso de indicadores como el MTBF, MTTR y disponibilidad, ya que permite identificar tendencias, variaciones y patrones en el desempeño del mantenimiento. Montgomery y Runger (2018) destacan que “la estadística aplicada a la ingeniería es esencial para fundamentar decisiones operativas con base en evidencia, lo que contribuye a reducir la variabilidad e incertidumbre en sistemas técnicos” (p. 167). Esta herramienta resulta particularmente útil en industrias como la distribución de gas, donde la confiabilidad y el control de fallas son prioritarios para mantener la continuidad operativa.

La Tabla 2 presenta los indicadores y las fórmulas de mantenimiento.

Tabla 2. Indicadores y fórmulas de mantenimiento

Indicador	Fórmula	Descripción
MTBF	$\frac{\text{Tiempo total de operación}}{\text{Número de fallas}}$	Tiempo promedio entre fallas, mide confiabilidad.
MTTR	$\frac{\text{Tiempo total de reparación}}{\text{Número de fallas}}$	Tiempo promedio de reparación, mide eficiencia.
Disponibilidad	$\frac{MTBF}{MTBF + MTBR}$	Proporción de tiempo operativo respecto al total.

Nota: Elaboración propia.

Además de los indicadores clásicos como el MTBF y el MTTR, existen otros que complementan el análisis del mantenimiento, como el OEE (Overall Equipment Effectiveness), el cual evalúa la efectividad global de un equipo considerando tres factores: disponibilidad, rendimiento y calidad. Este indicador facilita el diagnóstico de pérdidas ocultas y detectar oportunidades integrales de mejora. De conformidad con Montgomery y Runger (2018), “el OEE proporciona una visión cuantitativa del desempeño operativo de los equipos, facilitando acciones estratégicas de mejora continua” (p. 170). Su implementación resulta especialmente útil en entornos industriales como la distribución de gas, donde la eficiencia y la confiabilidad de los equipos son prioritarias.

El empleo de indicadores financieros asociados al mantenimiento también es importante para evaluar el impacto económico de las acciones y justificar inversiones. Por ende, indicadores como el costo por hora de operación, el costo de reparación por fallo o el retorno de inversión en mantenimiento permiten evaluar la rentabilidad y sostenibilidad de las estrategias aplicadas (Heizer y Render, 2014, p. 312).

A continuación, en la figura 3 se muestran los componentes del indicador OEE.

Figura 3. Componentes del Indicador OEE



Nota: Tomado de Sistemasoe.

2.1.4 Herramientas para la recolección de datos

En la elaboración de un plan de mantenimiento eficiente es indispensable contar con datos confiables y precisos. La recolección de datos es una etapa crítica, ya que de ella depende la calidad de los análisis posteriores. En el contexto industrial, existen herramientas diseñadas para facilitar este proceso, tanto desde una perspectiva cualitativa como cuantitativa. La selección de la herramienta adecuada depende del tipo de información requerida, del entorno operacional y de los recursos disponibles.

Una de las técnicas más utilizadas es la observación directa que permite al analista registrar, sin intervención, el comportamiento natural de los sistemas y del personal. Hernández-Sampieri et al. (2014) mencionan que “la observación es útil para captar información sobre procesos no documentados o prácticas informales que afectan el desempeño” (p. 157). En el mantenimiento industrial, esta técnica se aplica para detectar señales tempranas de fallas como ruidos anormales, vibraciones o presencia de fugas.

Por otra parte, una herramienta común es la lista de verificación o checklist. Se trata de un formato estructurado que facilita la recopilación sistemática de datos sobre el estado de los equipos, condiciones de operación o cumplimiento de rutinas de mantenimiento. Estas listas son elaboradas con base en manuales técnicos y experiencia de campo, y ayudan a estandarizar la inspección de

componentes críticos. Heizer y Render (2014) recomiendan su uso “para garantizar que ningún paso importante sea omitido durante los procedimientos de inspección o intervención” (p. 309).

El uso de formularios digitales en aplicaciones móviles ha modernizado esta herramienta, permitiendo el almacenamiento automático de la información, su análisis en tiempo real y su integración con sistemas de mantenimiento computarizados (CMMS). Este tipo de integración mejora la trazabilidad de los datos y permite tomar decisiones oportunas con base en evidencia empírica.

En la tabla 3 se da un ejemplo de estructura de una lista de verificación para mantenimiento.

Tabla 3. Estructura de una lista de verificación para mantenimiento.

Ítem de Verificación	Estado
Revisar nivel de aceite del compresor	[]
Verificar presión de descarga	[]
Inspeccionar conexiones eléctricas	[]
Confirmar estado de filtros	[]
Registrar horas de operación	[]

Nota: Elaboración propia con base en protocolos de inspección de compresores Corken.

La triangulación de métodos, que consiste en combinar varias herramientas de recolección, permite validar la información obtenida y fortalecer su confiabilidad. Por ejemplo, la observación directa puede complementarse con entrevistas al personal de operación o con el análisis de registros históricos de mantenimiento. Según Hernández-Sampieri et al. (2014), esta combinación metodológica “mejora la comprensión integral del fenómeno estudiado y reduce el sesgo en la interpretación de los datos” (p. 162).

Con herramientas como la observación, los checklist, y los sistemas de monitoreo digital es posible estructurar la información de forma confiable, facilitando la posterior selección de estrategias de mantenimiento adecuadas y alineadas con las condiciones reales del sistema industrial.

2.1.5 Herramientas de estadística

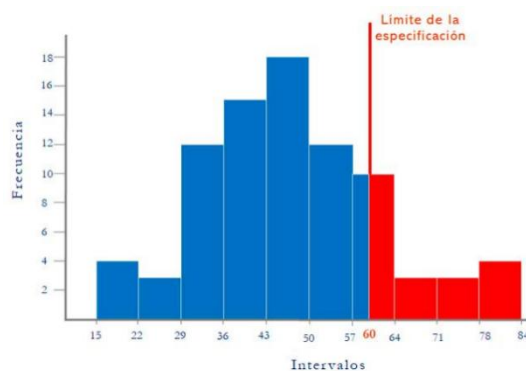
Las herramientas estadísticas permiten transformar datos recolectados en información útil para la toma de decisiones dentro de un plan de mantenimiento. Su aplicación facilita la identificación de tendencias, la detección de patrones de falla y la evaluación de la efectividad de las estrategias implementadas. Según Montgomery y Runger (2018), el análisis estadístico constituye “una base

cuantitativa sólida para mejorar procesos industriales y aumentar la confiabilidad operativa” (p. 11).

Esas herramientas posibilitan decisiones fundamentadas en evidencia empírica. El uso combinado de histogramas, diagramas de Pareto, análisis de regresión y control estadístico de procesos (CEP) fortalece la capacidad de respuesta ante fallas y ayuda a priorizar intervenciones técnicas. Montgomery y Runger (2018) subrayan que “las decisiones basadas en datos son más confiables, reproducibles y justificables en entornos industriales complejos” (p. 19). Estas metodologías son especialmente útiles en industrias como la del gas, donde el monitoreo sistemático de los equipos críticos es fundamental para garantizar seguridad y continuidad operativa.

Una herramienta fundamental es el histograma que permite visualizar la distribución de datos, facilitando la identificación de valores atípicos o desviaciones. En mantenimiento, los histogramas son útiles para analizar tiempos de reparación, frecuencia de fallos o variabilidad en parámetros de operación. Esta visualización gráfica ayuda a detectar comportamientos no deseados y a enfocar recursos en áreas críticas. La Figura 4 muestra un ejemplo de un histograma.

Figura 4. Histograma



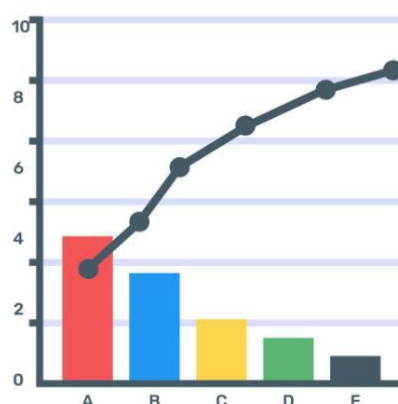
Nota: Tomado de Aiteco Consultores.

Otra herramienta estadística ampliamente utilizada es el diagrama de Pareto, el cual permite clasificar las causas de fallas o problemas según su impacto, bajo el principio 80/20. Este enfoque visual facilita la priorización de acciones correctivas al identificar las pocas causas que provocan la mayoría de los efectos adversos. Según Montgomery y Runger (2018), “el análisis de Pareto ayuda a enfocar los esfuerzos de mejora donde realmente generarán mayor beneficio, al distinguir las causas vitales de las triviales” (p. 45). En el contexto del mantenimiento industrial, esta

herramienta es útil para asignar recursos técnicos a los equipos más críticos y reducir fallas recurrentes.

La Figura 4 muestra un ejemplo de un Diagrama de Pareto, una herramienta que se utiliza para identificar y priorizar las causas principales de un problema basándose en el principio de Pareto, que establece que aproximadamente el 80% de los problemas son causados por el 20% de las causas.

Figura 5. Diagrama de Pareto



Nota: Tomado de la Revista Conciencia Tecnológica.

2.2 Herramientas para Describir el Problema

Los diagramas de flujo son herramientas gráficas que permiten representar la secuencia de pasos de un proceso mediante símbolos estandarizados. En el contexto del mantenimiento industrial, su utilización facilita la comprensión de los procedimientos técnicos, la detección de cuellos de botella y la mejora de la eficiencia operativa.

Conforme con Heizer y Render (2014), “los diagramas de flujo son fundamentales para entender, analizar y rediseñar procesos productivos y de servicios” (p. 148). Su representación visual clara permite observar las relaciones entre actividades, decisiones y resultados, lo que resulta esencial en entornos donde se requiere una documentación técnica precisa, como el mantenimiento de equipos críticos.

Por otro lado, Vilardell (2022) señala que el uso de herramientas gráficas “contribuye a estandarizar procesos y eliminar tareas innecesarias, lo que se traduce en mayor eficiencia en el mantenimiento

preventivo” (p. 83). Esta afirmación evidencia la importancia de los diagramas en la implementación de estrategias de mejora continua.

Los diagramas de flujo también contribuyen a mejorar la capacitación del personal, dado que ofrecen una representación visual del proceso que facilita la transmisión del conocimiento técnico (Montilla, 2019). De hecho, cuando se implementan de forma correcta, estos esquemas ayudan a reducir la variabilidad en la ejecución de tareas técnicas.

Al mismo tiempo, Montilla (2019) explica que, para construir un diagrama de flujo efectivo en el área de mantenimiento, se deben seguir pasos bien definidos:

1. Establecer el objetivo del diagrama, considerando su uso: diagnóstico, rediseño o documentación de un proceso.
2. Delimitar los puntos de inicio y fin, identificando claramente los límites del proceso representado.
3. Ordenar las actividades en secuencia cronológica, diferenciando tareas operativas, decisiones y validaciones técnicas.
4. Utilizar símbolos estandarizados, como rectángulos (actividad), rombos (decisión), óvalos (inicio/fin) y flechas (flujo).
5. Validar el proceso con los actores técnicos involucrados, asegurando su fidelidad con la realidad operativa.

En síntesis, se puede afirmar que los diagramas de flujo son herramientas clave para representar procedimientos de mantenimiento como inspecciones, intervenciones correctivas o planes de lubricación. Su correcta aplicación, respaldada por literatura técnica, contribuye a aumentar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos industriales (Vilardell, 2022).

La Tabla 4 presenta un ejemplo de un mapa de Procesos de Mantenimiento Correctivo.






Tabla 4. Mapa de Procesos de Mantenimiento Correctivo

Actividad	Responsable	Entrada	Salida
Reporte de Falla	Operador	Falla detectada	Orden de trabajo
Evaluación técnica	Técnico	Orden de trabajo	Diagnóstico
Reparación del equipo	Técnico	Diagnóstico	Equipo reparado
Verificación funcional	Supervisor	Equipo reparado	Validación de operación
Cierre de orden	Supervisor	Validación de operación	Orden cerrada

Nota: Elaboración propia con base en procedimiento interno de mantenimiento.

De igual manera, con la figura 6 se ilustra con claridad la simbología de un diagrama de flujo.

Figura 6. Diagrama de Flujo

	Símbolo	Función
Líneas de flujo		Conectan los pasos, etapas, decisiones y otros elementos que intervienen en los diagramas
Decisión		Se usan para indicar las elecciones y decisiones realizadas.
Datos		Ofrecen información nueva, de interés o de gran valor para el desarrollo del proceso representado.
Actividad		Indican las acciones que se transforman en datos que dan continuidad al proceso.
Inicio / final		Se utiliza cada vez que se indica el problema/ solución en el diagrama de flujo marcando el inicio y cierre de mismo.

Nota: Tomado de GFCFGlobal

2.3 Herramientas para medir las consecuencias

El análisis de consecuencias faculta la comprensión del impacto que tienen los fallos o deficiencias de mantenimiento sobre distintos aspectos del sistema industrial, como la disponibilidad operativa, la seguridad, los costos, y el cumplimiento normativo. Identificar y cuantificar estos efectos permite priorizar acciones correctivas, justificar inversiones y prevenir riesgos graves, especialmente en industrias con altos estándares de seguridad como el sector del gas licuado de petróleo (GLP).

Una herramienta esencial en esta etapa es el Análisis de Modo y Efecto de Fallas (FMEA, por sus siglas en inglés). Este método permite identificar sistemáticamente los modos de falla potenciales, evaluar sus consecuencias y establecer prioridades de atención mediante la asignación de un número de prioridad de riesgo (RPN). Este indicador se obtiene multiplicando la gravedad (S) del efecto, la ocurrencia (O) de la causa y la probabilidad de detección (D).

La figura 7 muestra la fórmula por utilizar para calcular el RPN:

Figura 7. Fórmula del RPN

$$RPN = S \cdot O \cdot D$$

Nota: Tomado de Mantenimiento Industrial y su Administración.

Por su parte, Heizer y Render (2014) explican que el FMEA constituye una herramienta clave dentro del mantenimiento industrial, en vista de que “ayuda a anticiparse a fallas críticas, evaluar su impacto y establecer planes de acción eficaces que minimicen el riesgo y optimicen los recursos disponibles” (p. 316).

El procedimiento para aplicar el FMEA debe seguir una estructura metodológica clara y participativa. Según Montilla (2019):

El análisis FMEA debe desarrollarse en equipo e incluye los siguientes pasos:

1. Identificación del sistema o equipo a evaluar, considerando su nivel de criticidad dentro del proceso.
2. Descomposición funcional del equipo en subsistemas o componentes críticos para detectar fallas posibles.
3. Determinación de los modos de falla, es decir, las formas en las que el equipo puede dejar de cumplir su función esperada.
4. Análisis de las causas de cada modo de falla, utilizando fuentes como reportes históricos, experiencias del personal técnico o estudios técnicos.
5. Descripción de los efectos de cada falla sobre el proceso, el producto, la seguridad y el entorno.
6. Asignación de valores numéricos a los factores de gravedad, ocurrencia y detección en una escala de 1 a 10.

7. Cálculo del RPN para cada modo de falla y su ordenamiento según criticidad.
8. Propuesta de acciones correctivas o preventivas que reduzcan la ocurrencia o mejoren la capacidad de detección.
9. Seguimiento del plan de acción y reevaluación de los RPN para verificar su reducción efectiva. (p. 101)

Estos pasos deben ser documentados en una hoja técnica FMEA donde se especifique el equipo, su componente, el modo de falla, su efecto, causa, valores de S, O y D, el RPN y las acciones recomendadas.

Como complemento del FMEA, se puede aplicar el análisis de impacto operativo que se enfoca en cuantificar el tiempo promedio de parada (TPI), el número de incidentes críticos y el efecto financiero de las fallas. Esta herramienta facilita priorizar decisiones basadas en datos históricos, como recomienda Montilla (2019), quien señala que “el análisis de impacto permite identificar los eslabones más críticos de la cadena de valor y cuantificar los costos ocultos asociados a los tiempos de inactividad” (p. 78). Esto resulta clave en industrias como la distribución de GLP, donde las fallas pueden tener consecuencias severas.

Seguidamente, en la tabla 5 se describe la Clasificación de Consecuencias de Fallos en Plantas de Gas.

Tabla 5. Clasificación de Consecuencias de Fallos en Plantas de Gas

Tipo de Consecuencia	Descripción Ejemplo
Operativa	Paro de producción, retraso en entregas
Financiera	Pérdidas por producción detenida o desperdicio
Legal	Multas por incumplimiento de normativas
Ambiental	Emisión de gases, fugas o contaminación
Seguridad	Riesgos para operarios y población cercana

Nota: Elaboración propia con base en normativa ISO 14224 e informes técnicos de Z Gas Costa Rica.

2.4 Herramientas para analizar las causas

Una vez descrito el problema y comprendidas sus consecuencias, es fundamental identificar las causas que lo originan. Este análisis permite diseñar soluciones efectivas que eliminen las raíces del problema y no solo sus síntomas. Montgomery y Runger (2018) señalan que “la identificación de las causas fundamentales es esencial para implementar mejoras sostenibles, y para ello se deben

utilizar herramientas estadísticas y de análisis que garanticen el soporte objetivo a las decisiones” (p. 130). Las herramientas para este fin deben centrarse en la búsqueda de explicaciones profundas, basadas en datos y evidencia empírica.

Una de las herramientas más empleadas es el diagrama de causa y efecto, también conocido como diagrama de Ishikawa o espina de pescado. Este recurso gráfico organiza las posibles causas de un problema según categorías como métodos, maquinaria, materiales, mano de obra, medio ambiente y medición. Según Vilardell (2022), “el diagrama de causa-efecto ayuda a visualizar las causas principales y secundarias de un fallo, facilitando el análisis estructurado y la toma de decisiones en equipos técnicos” (p. 74). En el contexto del mantenimiento industrial, su aplicación permite identificar fallas recurrentes en equipos críticos como compresores o bombas, lo cual mejora la planificación de acciones correctivas y preventivas.

Montgomery y Runger (2018) añaden al respecto que:

La identificación de las causas fundamentales es esencial para implementar mejoras sostenibles, y para ello se deben utilizar herramientas estadísticas y de análisis que garanticen el soporte objetivo a las decisiones. A través de técnicas como el diagrama de Ishikawa y el método de los cinco porqués, es posible desglosar un problema en sus componentes esenciales, permitiendo a los equipos de trabajo desarrollar soluciones efectivas y duraderas. Este enfoque no solo resuelve problemas inmediatos, sino que también previene la recurrencia de estos al abordar las causas fundamentales. (p. 130)

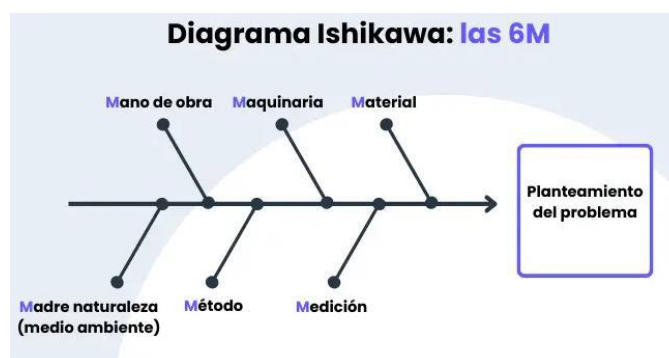
Los mismos autores mencionan los pasos para realizar un análisis de causa raíz:

- Definición del problema: Identificar claramente el problema que se desea analizar y su impacto en el proceso o producto.
- Recopilación de datos: Recolectar datos relevantes y específicos sobre el problema, tanto cuantitativos como cualitativos, mediante revisión documental, entrevistas y registros técnicos.
- Análisis preliminar: Utilizar herramientas como el diagrama de Ishikawa (causa y efecto) para identificar posibles causas del problema.

- Método de los cinco porqués: Profundizar en las causas raíz utilizando esta técnica, que consiste en preguntar repetidamente “¿por qué?” para llegar a la causa principal detrás de cada respuesta inicial.
- Validación: Verificar las causas raíz identificadas con base en datos y evidencias, confirmando que efectivamente sean las causas del problema.
- Desarrollo de soluciones: Generar soluciones efectivas y sostenibles para eliminar o mitigar las causas raíz.
- Implementación y monitoreo: Poner en práctica las soluciones y monitorear continuamente el proceso para asegurar que las causas raíz hayan sido adecuadamente atendidas. (Montgomery y Runger, 2018, p. 130)

En la Figura 8 se presenta un ejemplo de un diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de causa y efecto o diagrama de espina de pescado.

Figura 8. Diagrama de Ishikawa



Nota: Tomado de la Norma UNE - EN ISO 9001:2000.

Otra herramienta clave es el método de los cinco porqués (5 Why's), desarrollado originalmente por Toyota. El método de los cinco porqués es una técnica sencilla y efectiva para identificar las causas raíz de un problema mediante una serie de preguntas repetidas “¿por qué?”. Montilla (2019) explica que este método “permite descubrir causas ocultas que muchas veces no se detectan con análisis superficiales” (p. 92). Este resulta especialmente valioso en entornos de mantenimiento industrial para identificar errores humanos, fallas operativas o problemas sistémicos.

Para entender mejor cómo aplicar este método, Hernández-Sampieri et al. (2014) describen detalladamente los pasos a seguir en un análisis con los cinco porqués:

El análisis con los cinco porqués consiste en formular una pregunta ‘¿por qué?’ de manera repetida para profundizar en las causas de un problema hasta llegar a la raíz. El procedimiento típico incluye:

1. Plantear claramente el problema o síntoma detectado.
2. Formular la primera pregunta ‘¿por qué ocurrió esto?’, buscando respuestas basadas en evidencia.
3. Al obtener la respuesta, volver a preguntar ‘¿por qué?’ sobre esa causa identificada.
4. Repetir el proceso varias veces (generalmente cinco), hasta que se identifique una causa raíz que pueda ser controlada o corregida.
5. Documentar cada paso del análisis para validar y comunicar los hallazgos. Esta técnica es eficaz porque ayuda a evitar soluciones superficiales y permite atacar las verdaderas causas de los problemas, favoreciendo la mejora continua. (p. 215)

Adicionalmente, esta técnica se complementa con otras herramientas que amplían el análisis de las causas. Por ejemplo, el análisis de correlación es una herramienta estadística que ayuda a descubrir patrones entre variables que pueden estar relacionadas con las fallas. Montgomery y Runger (2018) indican que el análisis de correlación “es fundamental para descubrir patrones ocultos en grandes conjuntos de datos históricos” (p. 116), lo cual permite identificar factores como la influencia de variables ambientales en la frecuencia de fallas.

En el caso de problemas más complejos donde intervienen múltiples causas y efectos, la matriz de relaciones es una herramienta útil que asigna pesos o puntuaciones a la influencia de cada causa sobre cada efecto, ayudando a priorizar las intervenciones. Los pasos básicos para aplicar una matriz de relaciones incluyen listar causas y efectos, asignar puntuaciones de influencia, sumar resultados y analizar para tomar decisiones (Montilla, 2019).

2.5 Herramientas para la propuesta

En primera instancia, para desarrollar una propuesta de mejora en mantenimiento industrial es indispensable aplicar herramientas que aseguren su viabilidad técnica, alineación con la estrategia organizacional y sostenibilidad operativa. Montilla (2019) destaca que “el mantenimiento debe integrarse como una función activa dentro del sistema de gestión de calidad, asegurando la coordinación entre áreas para optimizar resultados” (p. 112). Esto conlleva una planificación

estructurada que contemple la criticidad de los activos, la capacidad operativa y el cumplimiento del marco regulatorio.

Una metodología ampliamente reconocida para la mejora continua en mantenimiento es el enfoque de Total Productive Maintenance (TPM). Esta estrategia se caracteriza por involucrar a todo el personal, desde operarios hasta gerentes, en actividades como mantenimiento autónomo, mejora continua, capacitación técnica y gestión visual. Montilla (2019) afirma que “TPM ayuda a eliminar desperdicios como tiempos de parada, aumentando la eficiencia y disponibilidad de los equipos críticos” (p. 115). En industrias de alta demanda como la del gas licuado de petróleo, el TPM es clave para reducir fallos imprevistos y asegurar la continuidad operacional.

Para alinear las acciones de mantenimiento con los objetivos estratégicos de la empresa, el Cuadro de Mando Integral (CMI) es una herramienta fundamental. Según Heizer y Render (2014), “la planeación del mantenimiento es esencial para garantizar operaciones eficientes y minimizar costos asociados con fallos no previstos” (p. 304). El CMI facilita la gestión del desempeño mediante indicadores distribuidos en cuatro dimensiones: financiera, clientes, procesos internos, y aprendizaje y crecimiento, lo que permite un monitoreo constante y oportuno.

La implementación de la norma ISO 55000 brinda un marco formal para la gestión de activos físicos, promoviendo prácticas que maximicen el valor durante todo el ciclo de vida de los equipos. Esta norma establece un enfoque de mejora continua basado en el riesgo, algo crucial en sectores como el gas LP, donde la confiabilidad y seguridad son prioritarias (ISO, 2014). La gestión según ISO 55000 garantiza que el mantenimiento sea estratégico y esté alineado con las metas organizacionales.

La planificación basada en riesgos (RBM) es otra estrategia clave. Señalan Montgomery y Runger (2018) que “la probabilidad y severidad de una falla deben guiar la frecuencia y el tipo de mantenimiento aplicado, optimizando así la asignación de recursos” (p. 211). Esto se logra mediante herramientas estadísticas como el análisis de confiabilidad, el cálculo del MTBF y la curva de la bañera, permitiendo priorizar equipos críticos para una asignación costo-efectiva de recursos.

El modelo SCOR (Supply Chain Operations Reference) ofrece un marco para analizar cómo el mantenimiento impacta en el rendimiento logístico general. Montilla (2019) apunta que “la sincronización entre mantenimiento y logística es fundamental para evitar cuellos de botella en

procesos industriales continuos” (p. 101), una consideración crítica en plantas de trasiego de GLP, donde la disponibilidad de equipos es esencial.

A su vez, la mejora continua a través de metodologías como Kaizen o prácticas ágiles aporta flexibilidad y adaptación en la implementación de mejoras. Vilardell (2022) subraya que “la mejora continua en mantenimiento industrial requiere un enfoque participativo y adaptativo, que incluya tanto al equipo técnico como a la gerencia, para asegurar la sostenibilidad de los procesos” (p. 154).

Montilla (2019) describe el proceso de diseño y planificación de una mejora en mantenimiento industrial como un conjunto de pasos estructurados que aseguran la eficacia y alineación estratégica:

El diseño de una propuesta de mejora debe iniciarse con un diagnóstico inicial que permita evaluar el estado actual del mantenimiento y la criticidad de los equipos involucrados. Esto sienta las bases para la identificación de objetivos claros, que estén alineados con la estrategia organizacional. Es fundamental seleccionar metodologías que se adapten a la realidad operativa y regulatoria, tales como TPM, planificación basada en riesgos y normas internacionales como ISO 55000. Una vez definidas estas bases, se procede a estructurar un plan detallado de actividades y asignación de recursos, utilizando herramientas estadísticas y modelos logísticos para priorizar intervenciones. La implementación requiere capacitación y participación activa de todo el personal, mientras que el monitoreo constante, apoyado en metodologías de mejora continua como Kaizen, garantiza ajustes oportunos y la sostenibilidad de los procesos. (p. 110)

Por su lado, Heizer y Render (2014) enfatizan que:

La representación visual de los procesos y resultados es crucial para la comprensión y gestión efectiva del mantenimiento. Para ello, se recomienda el uso de cuadros de mando integral que empleen gráficos circulares o de barras para ilustrar indicadores financieros, operativos y de aprendizaje. Los diagramas de flujo son útiles para visualizar los procesos de mantenimiento y la coordinación interdepartamental. La matriz de riesgos, mediante tablas que cruzan probabilidad y severidad, ayuda a priorizar los equipos críticos. Además, los gráficos de Pareto facilitan la

identificación de las fallas más recurrentes, permitiendo enfocar esfuerzos de mejora donde más impacto generan. (p. 308)

2.6 Herramientas para el control de la implementación de la propuesta

Una vez diseñada la propuesta, es indispensable establecer mecanismos que permitan controlar su implementación de forma efectiva. Este control garantiza que las actividades planificadas se ejecuten conforme a los estándares técnicos, tiempos establecidos, costos presupuestados y niveles de calidad esperados. Montgomery y Runger (2018) destacan que “el control estadístico y financiero del proceso es fundamental para lograr resultados sostenibles en operaciones industriales complejas” (p. 219). Por ello, las herramientas de control se convierten en instrumentos clave para asegurar el cumplimiento de los objetivos del mantenimiento.

En este contexto, una herramienta ampliamente utilizada es el diagrama de Gantt, que facilita la programación y visualización del avance de tareas a lo largo del tiempo. Heizer y Render (2014) recomiendan su uso “en proyectos de mantenimiento para asegurar una implementación ordenada, especialmente en equipos de alta criticidad” (p. 314).

2.6.1 Herramientas para el análisis económico

De acuerdo con Montilla (2019), el análisis costo-beneficio “constituye una herramienta clave para evaluar la eficiencia del mantenimiento, ya que permite establecer si las acciones ejecutadas aportan beneficios económicos mayores que los recursos invertidos” (p. 124).

La evaluación financiera de proyectos se traduce en una herramienta determinante para valorar la conveniencia económica de inversiones en activos críticos, en particular en industrias donde la continuidad operativa depende del desempeño de equipos especializados, como el sector GLP. Entre los métodos más utilizados destacan el Valor Actual Neto (VAN), el Periodo de Recuperación (Payback) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), los cuales permiten estimar el rendimiento esperado de una propuesta considerando el valor del dinero en el tiempo. Afirman Ross et al. (2018) que “el VAN es el criterio más robusto para medir la creación de valor, ya que incorpora la magnitud, el riesgo y el momento de los flujos de efectivo del proyecto” (pp. 138–139).

En la Figura 9 se muestra la fórmula para calcular el VAN.

Figura 9. Fórmula del Valor Actual Neto (VAN)

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

Nota: Tomado de Ross et al. (2018).

El VAN ayuda a determinar si un proyecto genera valor para la organización; un resultado positivo indica que los flujos futuros descontados superan la inversión inicial. Según Ross et al. (2018), este método “es conceptualmente superior porque considera la totalidad del horizonte temporal e integra explícitamente el valor del dinero en el tiempo, lo que favorece decisiones estratégicas más precisas en entornos industriales como el mantenimiento de infraestructura crítica” (p. 139).

Por otra parte, la Tasa Interna de Retorno (TIR) representa la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Este indicador expresa la rentabilidad relativa de un proyecto de forma porcentual, facilitando su comparación con tasas mínimas aceptables de rendimiento o con alternativas de inversión. Ross et al. (2018) explican que la TIR es ampliamente utilizada “debido a su claridad interpretativa, aunque recomiendan emplearla únicamente en proyectos con flujos de caja convencionales para evitar ambigüedades” (pp. 140–141).

La figura 10 presenta la fórmula para calcular el TIR.

Figura 10. Fórmula de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} - I_0$$

Nota: Tomado de Ross et al. (2018).

El payback, a pesar de ser un método simplificado, continúa siendo común en evaluaciones preliminares debido a su facilidad de cálculo. Este indicador estima el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial mediante los flujos de efectivo generados por el proyecto. No obstante, Ross et al. (2018) advierten que su principal limitación es ignorar los flujos posteriores al periodo de recuperación, lo que puede derivar en decisiones subóptimas cuando se analizan proyectos de largo plazo o con beneficios altos pero tardíos (p. 138). Aun así, su utilidad práctica como filtro inicial lo mantiene vigente en análisis operativos y de mantenimiento.

En la figura 11 se aprecia la fórmula para calcular el payback.

Figura 11. Fórmula del payback

$$\text{Payback} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Flujo Promedio Anual}}$$

Nota: Tomado de Ross et al. (2018).

El autor Montilla (2019) que el control efectivo de la implementación debe seguir una secuencia clara de pasos, que incluyen la definición, seguimiento y verificación, y que la simbología visual es clave para la gestión y comunicación de avances:

El control comienza con la elaboración de la estructura de desglose del trabajo (EDT), donde se identifican y desglosan todas las tareas específicas, asignando responsables, recursos y tiempos estimados para cada actividad. Esta estructura permite una visión ordenada y facilita la planificación detallada del proyecto. A continuación, se debe implementar un seguimiento periódico utilizando herramientas como el diagrama de Gantt, que representa gráficamente la ejecución temporal de las actividades y facilita la identificación de retrasos o desviaciones. Es fundamental complementar este seguimiento con controles financieros que evalúen el gasto real versus el presupuesto, utilizando indicadores económicos y análisis costo-beneficio para tomar decisiones oportunas. Además, el control de calidad sobre los entregables asegura que cada actividad cumpla con los estándares técnicos, mediante listas de verificación, pruebas funcionales y validación conforme a normativas como la ISO 9001. Finalmente, la comunicación efectiva y el liderazgo juegan un papel decisivo, por lo que se deben realizar reuniones de avance, informes periódicos y gestión de incidencias para retroalimentar al equipo y cerrar el ciclo de mejora continua. (p. 136)

Con respecto a la simbología recomendada, Heizer y Render (2014) añaden que:

Para una gestión visual efectiva se recomienda el uso de diagramas de flujo para representar procesos, diagramas de Gantt para programación temporal, y matrices de control que cruzan variables clave como costos, tiempos y calidad. Los gráficos de barras y circulares facilitan el monitoreo de indicadores financieros y operativos, mientras que las listas de verificación estandarizadas son indispensables para validar

la conformidad técnica. La combinación de estas representaciones visuales permite una comprensión integral del estado del proyecto y soporta la toma de decisiones en tiempo real. (p. 310)

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se establecen los aspectos metodológicos que respaldan el desarrollo de la presente investigación sobre el plan de mantenimiento para los equipos críticos de distribución en Z Gas Costa Rica. Por medio de la definición del enfoque, alcance, diseño, variables, muestreo, instrumentos de recolección, análisis de datos, cronograma e indicadores, se pretende garantizar la rigurosidad técnica del estudio y la validez de sus hallazgos. Esta metodología ha sido seleccionada con base en la naturaleza cuantitativa del problema, la necesidad de establecer relaciones entre variables técnicas y operativas, y la factibilidad de acceso a datos históricos y observación directa de los equipos.

3.1 Enfoque

Existen tres tipos de enfoque de investigación que son cualitativo, cuantitativo y mixto. El enfoque cualitativo se basa en la comprensión de fenómenos sociales desde la perspectiva de los participantes, mediante técnicas como entrevistas, observación participante o grupos focales. Este enfoque se caracteriza por la interpretación subjetiva de la realidad y el análisis en profundidad de casos particulares (Hernández -Sampieri et al., 2014, p. 7).

Por su parte, el enfoque cuantitativo utiliza la recolección y el análisis de datos numéricos para probar hipótesis, establecer patrones y relaciones causales, y generalizar resultados a poblaciones más amplias. Este enfoque aplica instrumentos estandarizados, procedimientos estadísticos y requiere muestras representativas para validar sus resultados. Señalan Hernández -Sampieri et al. (2014) que:

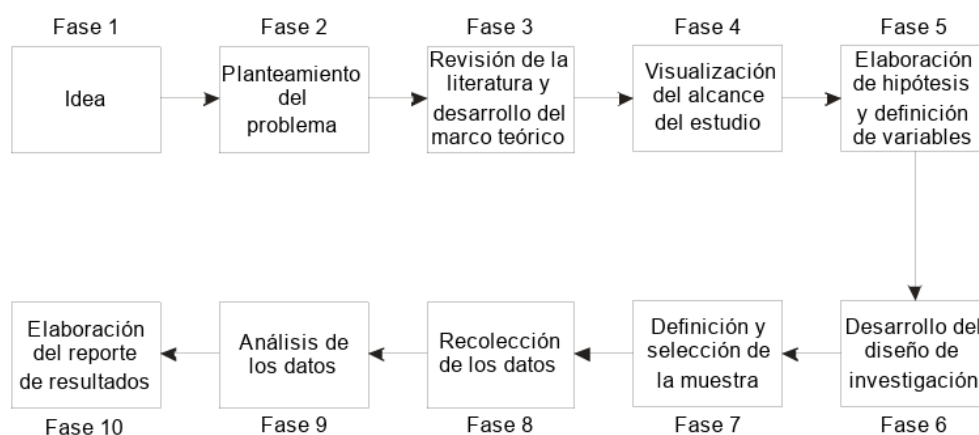
Este tipo de enfoque utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecidas previamente. Utiliza la estadística para establecer patrones de comportamiento, relaciones causales, diferencias entre grupos y otros fenómenos observables. Se fundamenta en el uso de la medición numérica y el análisis estadístico para establecer relaciones entre variables y formular leyes que puedan ser generalizadas. (p. 4)

En cuanto al enfoque mixto se combinan técnicas de los enfoques cualitativo y cuantitativo. Su propósito es aprovechar la profundidad del análisis cualitativo con la objetividad del análisis cuantitativo, desarrollando investigaciones más integrales (Hernández-Sampieri et al., 2014, p. 538).

En esta investigación se adopta el enfoque cuantitativo, dado que se pretende recopilar, analizar y comparar datos objetivos relacionados con el mantenimiento industrial y su impacto sobre variables operativas como disponibilidad, confiabilidad y frecuencia de fallas en equipos críticos. Esta elección permite utilizar herramientas estadísticas para sustentar con evidencia empírica la propuesta técnica del plan de mantenimiento.

La Figura 12 ilustra como se desarrolla el proceso cuantitativo.

Figura 12. Proceso Cuantitativo



Nota: Tomado de Metodología de la Investigación (Hernández-Sampieri et al., 2014, p. 15).

3.2 Alcance

Los alcances posibles en una investigación se conocen como exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo. El alcance exploratorio se utiliza cuando el tema es poco estudiado y se desea obtener una primera aproximación al fenómeno. Este tipo de estudio permite identificar variables, formular preguntas y descubrir patrones preliminares. Según Hernández-Sampieri et al. (2014):

Los estudios exploratorios se efectúan normalmente cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado o del que se tienen muchas dudas. Permiten familiarizarse con fenómenos relativamente desconocidos, identificar variables relevantes, generar hipótesis iniciales y establecer las bases para estudios más profundos. (p. 85)

El alcance descriptivo busca detallar con precisión las características de un fenómeno, población o situación. No establece relaciones causales, pero permite conocer a fondo el comportamiento de una o más variables (Hernández-Sampieri et al., 2014, p. 88).

El alcance correlacional tiene como objetivo determinar la relación entre dos o más variables. No pretende establecer causalidad, pero sí evidencia si existe o no asociación entre ellas (Hernández-Sampieri et al., 2014, p. 91).

Y el alcance explicativo va más allá del correlacional, porque busca identificar las causas que originan un fenómeno. Se enfoca en el porqué de las relaciones entre variables y requiere un control metodológico más riguroso. En este sentido, los mismos autores señalan:

Los estudios explicativos están dirigidos a responder por las causas de los eventos físicos o sociales. Su propósito consiste en establecer por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da. Este tipo de estudios son los más estructurados, tienen un mayor nivel de profundidad en la recolección y el análisis de datos, y exigen al investigador mayor control metodológico. (Hernández-Sampieri et al., 2014, p. 95)

En este proyecto se establece un alcance explicativo, en vista de que se pretende no solo correlacionar el estado del mantenimiento con el desempeño técnico de los equipos, sino también explicar cómo la ausencia de un mantenimiento estructurado genera fallas recurrentes y cuál es el impacto que tendría un plan sistematizado sobre la operación.

3.3 Diseño

En los procesos de investigación el diseño metodológico puede clasificarse como experimental o no experimental. El diseño experimental implica la manipulación deliberada de una o más variables independientes para observar su efecto sobre variables dependientes, bajo condiciones controladas. Este diseño permite establecer relaciones causales (Hernández-Sampieri et al., 2014, p. 146).

En contraste, el diseño no experimental observa los fenómenos tal como ocurren, sin manipular las variables. Dentro de este grupo se encuentra el diseño transeccional, que recolecta los datos en un único momento en el tiempo, permitiendo describir situaciones y analizar relaciones entre variables en un punto específico. Los citados autores detallan que:

En los estudios transeccionales se recolectan datos en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. No se realiza seguimiento temporal de las variables, lo que los distingue de los estudios longitudinales. (Hernández-Sampieri et al., 2014, p. 151)

Otro tipo es el diseño longitudinal, que recolecta datos en diferentes momentos para observar cambios a lo largo del tiempo, que no aplica a la presente investigación, ya que no se analizará la evolución de las variables.

Para este trabajo se ha seleccionado un diseño no experimental de tipo transeccional, dado que se observará el estado actual del mantenimiento en los equipos críticos sin intervenir sobre ellos, recolectando datos en un solo momento mediante registros, observación directa e instrumentos estructurados.

3.4 Variables

Las variables representan los conceptos clave que serán objeto de análisis en la investigación. Su correcta definición permite operacionalizar los objetivos y garantizar la coherencia metodológica. Según Hernández-Sampieri et al. (2014), “una variable es una propiedad que puede variar y cuya variación es susceptible de medirse u observarse” (p. 92). En investigaciones cuantitativas como la presente, se deben establecer tanto definiciones conceptuales como operacionales, permitiendo su medición y análisis estadístico posterior.

Seguidamente se describen en la tabla 6, las variables evaluadas en este proyecto:

Tabla 6. Variables

Objetivo	Variable	Conceptual	Operacional	Instrumental
Describir las fallas de los equipos críticos en las operaciones de distribución en Z Gas Costa Rica.	Fallas en equipos críticos	Evento no deseado que interrumpe el funcionamiento de un equipo, reduciendo o anulando su capacidad operativa (ISO 14224, 2016).	Registro de fallas clasificadas por tipo, equipo, frecuencia, duración y severidad.	Bitácoras de mantenimiento de la planta y listas de verificación utilizadas por el personal técnico.

Medir la afectación de las fallas en los equipos críticos sobre la continuidad del servicio y la seguridad operativa.	Consecuencias de las fallas	Impacto operativo, económico y de seguridad generado por la ocurrencia de fallas funcionales en los equipos (Montgomery & Runger, 2018).	Registro del tiempo de parada, cantidad de eventos de riesgo, interrupciones del servicio asociadas a fallas.	Informes de incidentes operativos, reportes diarios de producción y formularios internos de evaluación de impacto.
Analizar las causas de las fallas en los equipos críticos de distribución en Z Gas Costa Rica.	Causas de fallas	Factores técnicos, humanos o ambientales que provocan una interrupción no planificada en el desempeño de un equipo (ISO 14224, 2016).	Categorización de causas mediante herramientas de análisis causa raíz (diagrama de Ishikawa y método de los 5 porqués).	Entrevistas con técnicos especializados, reportes técnicos de mantenimiento y actas de reuniones de análisis de fallas.
Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo para los equipos críticos de distribución.	Plan de mantenimiento	Estrategia organizada y planificada que establece tareas periódicas para evitar la ocurrencia de fallas y mantener la funcionalidad del equipo (Mobley, 2014; Vilardell, 2022).	Definición de actividades preventivas según equipo, frecuencia, recursos y responsables asignados.	Manuales de fabricante, historial de mantenimiento preventivo, políticas internas de mantenimiento de la empresa.
Establecer mecanismos de control para la implementación y seguimiento del plan de mantenimiento propuesto.	Control del mantenimiento	Actividad sistemática de seguimiento, medición y mejora del cumplimiento del plan de mantenimiento (Montilla, 2019; ISO 55000, 2014).	Análisis de indicadores de cumplimiento, desviaciones registradas, acciones correctivas implementadas.	Registros de cumplimiento de mantenimiento, auditorías internas, sistema de control de indicadores técnicos.

Nota: Elaboración propia.

3.5 Muestra

Esta sección define los parámetros del proceso de muestreo que permitirá seleccionar datos representativos para el análisis de las variables identificadas en la investigación. El muestreo es fundamental en estudios cuantitativos, porque permite estudiar una porción de la población con el fin de inferir comportamientos, relaciones y patrones. De acuerdo con Hernández-Sampieri et al. (2014) “Una muestra es un subconjunto de elementos que pertenecen a un conjunto mayor denominado población y cuya selección responde a criterios metodológicos que permiten asegurar su representatividad” (p. 179).

En este estudio se eligió un enfoque probabilístico, ya que se requiere obtener conclusiones representativas y confiables sobre las condiciones de mantenimiento y fallas de los equipos críticos en Z Gas Costa Rica. Dado que se cuenta con una base de datos histórica amplia y actualizada, esta técnica permite una selección objetiva, reduciendo el sesgo y aumentando la validez estadística.

La población está compuesta por los registros de mantenimiento, fallas, causas y controles de ejecución correspondientes a compresores, bombas y motores de los últimos tres años. Sin embargo, se delimita el análisis a un periodo específico: mayo a agosto del 2025, debido a que en ese lapso se concentra una alta carga operativa y se dispone de datos precisos y completos. Tal como indican Hernández-Sampieri et al. (2014):

El muestreo probabilístico se basa en leyes estadísticas que otorgan a cada unidad una probabilidad conocida de ser seleccionada, lo que permite inferir los resultados de la muestra a toda la población con un margen de error y nivel de confianza establecidos. (p. 175)

A continuación, en la tabla 7 se presenta el diseño muestral por objetivo específico:

Tabla 7. Muestra

Indicador	Tipo de muestra	Unidad de muestreo	Fórmula
Frecuencia de fallas por tipo de equipo crítico	Probabilística: Estratificada. Se segmentan los equipos en grupos (compresores, bombas, motores) y se toma muestra proporcional.	Fallas de los equipos críticos.	$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{E^2 \cdot (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$ $n_h = \frac{N_h}{N} \cdot n$
Tiempo promedio de parada por evento de falla	Probabilística: Aleatoria simple. Selección aleatoria de eventos.	Eventos de parada	$\frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{E^2 \cdot (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$
Causas de fallas clasificadas por categoría	Probabilística: Aleatoria simple. Registros con análisis de causa raíz documentado.	Registros técnicos.	$\frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{E^2 \cdot (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$
Nivel de cobertura del mantenimiento preventivo	No probabilística: Censal. Se evalúa la totalidad de las actividades programadas durante el periodo.	Actividades por grupo técnico.	(Actividades ejecutadas / Actividades planificadas) × 100.
Porcentaje de cumplimiento del plan de mantenimiento	No probabilística: Censal. Se toman todos los informes mensuales del periodo de análisis.	Informes mensuales	(Actividades realizadas / Actividades planificadas) × 100.

Nota: Elaboración propia.

3.6 Instrumentos

En esta sección se describen los instrumentos que se utilizarán para recolectar los datos necesarios en el estudio, los cuales deben ser adecuados para garantizar la validez y confiabilidad de la información obtenida. Según Hernández-Sampieri et al. (2014):

El instrumento de medición es el recurso que utiliza el investigador para registrar información o datos sobre las variables que le interesan, y debe diseñarse o seleccionarse con base en los objetivos de la investigación, el tipo de datos que se requieren y el contexto en el que se aplicará. (p. 215)

Para este estudio, se emplearán instrumentos estructurados, diseñados conforme a las necesidades técnicas del análisis de mantenimiento, tomando en cuenta los equipos, el tipo de intervención y los procedimientos internos de la empresa. En la tabla 8 se detallan los instrumentos utilizados a lo largo de la investigación para conocer, entender y analizar los procesos y cumplimiento de los requerimientos del proceso de alisto y preparación, tomando en cuenta su validez, confiabilidad y objetividad para cumplir el objetivo propuesto.

Tabla 8. Instrumentos

Indicador	Instrumento	Recursos requeridos
Fallas en equipos críticos	Lista de chequeo para detección de fallas, bitácoras de mantenimiento.	Bitácoras, manuales, personal técnico.
Consecuencias de las fallas	Formulario de evaluación de impacto, informes de incidentes.	Informes de seguridad, registros de parada.
Causas de fallas	Plantilla para análisis causa raíz, diagrama de Ishikawa, método de los 5 Porqués.	Software de análisis, entrevistas.
Plan de mantenimiento	Cronograma de mantenimiento preventivo, manuales técnicos.	Historial de fallas, manual técnico.
Control del mantenimiento	Lista de verificación de cumplimiento, cuadros de mando, reportes de avance.	Sistema de gestión de mantenimiento, auditorías.

Nota: Elaboración propia.

3.7 Recolección de Datos

Una vez definidos los instrumentos se hace necesario establecer el procedimiento mediante el cual se obtendrá la información. La recolección de datos consiste en aplicar los instrumentos seleccionados a las fuentes definidas, utilizando métodos adecuados al tipo de estudio. De acuerdo con Hernández-Sampieri et al. (2014):

La recolección de los datos implica obtener la información necesaria para responder las preguntas de investigación, probar hipótesis y cumplir con los objetivos planteados. Esta debe ser planificada con precisión para asegurar que la información obtenida sea pertinente, válida y confiable. (p. 231)

El método adoptado en este estudio será documental y observacional, recurriendo a registros técnicos internos de la empresa, listas de verificación, entrevistas dirigidas al personal técnico y la observación directa de los equipos. A continuación, la tabla 9 resume el proceso de recolección de fuentes y métodos por indicador:

Tabla 9. Recolección de Datos

Indicador	Fuente de los datos	Método de recolección de datos	Beneficios esperados
Fallas en equipos críticos	Bitácoras de fallas, lista de chequeo técnica, reportes técnicos.	Observación directa no participante en planta y revisión documental sistemática de bitácoras y reportes técnicos.	Determinar tipo, frecuencia y duración de fallas para priorizar acciones.
Consecuencias de las fallas	Informes de incidentes, registros de parada, formularios de evaluación de impacto.	Análisis documental de registros históricos y entrevistas semiestructuradas al personal operativo y de seguridad.	Estimar impacto real de las fallas sobre el servicio y seguridad operativa.
Causas de fallas	Registros con análisis de causa raíz, entrevistas al personal técnico.	Aplicación de técnicas de análisis causal (Diagrama de Ishikawa, método de los 5 Porqués) y entrevistas semiestructuradas para validación de información.	Identificar causas raíz y categorizarlas para diseñar planes de mitigación.
Plan de mantenimiento	Planillas internas de mantenimiento, manuales técnicos, cronogramas.	Revisión documental estructurada del plan técnico, complementada con entrevistas a encargados de mantenimiento.	Validar que el plan cubre las necesidades críticas y se ajusta a la criticidad de equipos.
Mecanismos de control	Reportes mensuales, sistema de gestión de	Análisis documental comparativo entre planificación y ejecución,	Medir cumplimiento, detectar desviaciones y

	mantenimiento (CMMS), listas de verificación.	auditorías internas y observación directa de tareas ejecutadas.	recomendar ajustes para mejora continua.
--	---	---	--

Nota: Elaboración propia.

3.8 Método de Análisis

Una vez recolectados los datos, se procede con su organización, procesamiento y estudio. El análisis de datos permite interpretar la información recolectada para dar respuesta a los objetivos del estudio, validar hipótesis y proponer mejoras. Hernández-Sampieri et al. (2014) afirman que “el análisis de datos cuantitativos implica organizar la información recolectada, aplicar técnicas estadísticas apropiadas, y presentar los resultados de manera clara y comprensible para extraer conclusiones que respondan a las preguntas de investigación” (p. 291).

La presente investigación utilizará herramientas estadísticas descriptivas apoyadas por software especializado. Toda la información recolectada se examina y se tabulada según el área de donde provenga, utilizando la herramienta de Excel para procesar los datos obtenidos y las facilidades que este programa ofrezca para manejo de la información, pues cuenta con una serie de características para el manejo de datos numéricos, generación de gráficas y diagramas requeridos para el análisis.

De seguido, en la tabla 10 se sintetiza la información descrita anteriormente.

Tabla 10. Método de Análisis

Indicador	Análisis por realizar	Programa	Uso
Fallas en equipos críticos	Cálculo de frecuencia absoluta y porcentaje de fallas por tipo, equipo y duración.	Microsoft Excel	Identificar patrones, prevalencia y prioridad de fallas en equipos críticos.
Consecuencias de las fallas	Medición del tiempo promedio de parada (TPI), desviación estándar y análisis de tendencia.	Minitab / Excel	Evaluar impacto de las fallas sobre la continuidad operativa y seguridad.

Causas de fallas	Tablas de frecuencia, diagramas de Pareto y análisis causa raíz.	Excel	Clasificar y priorizar causas principales para planificar acciones correctivas.
Plan de mantenimiento	Comparación entre mantenimiento planificado versus recomendado según criticidad.	Excel	Verificar suficiencia, ajuste y cobertura del plan preventivo.
Mecanismos de control	Cálculo de porcentaje de cumplimiento mensual y análisis de desviaciones.	Excel / Dashboard	Monitorear ejecución del plan, detectar desviaciones y sugerir mejoras.

Nota: Elaboración propia.

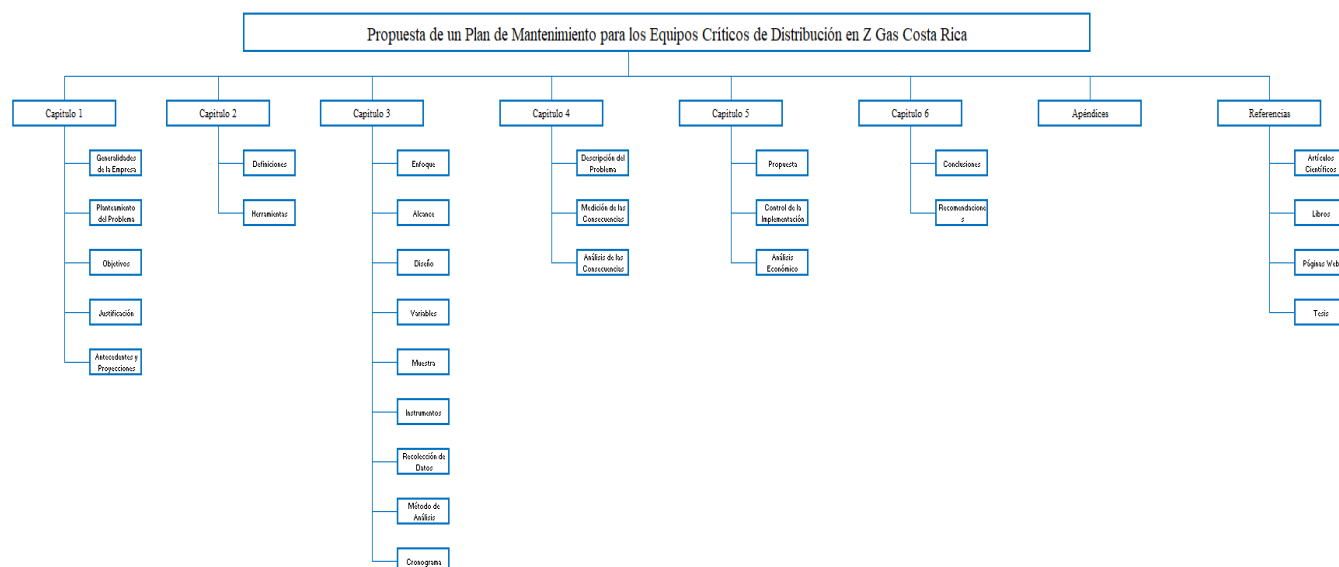
3.9 Cronograma

Para el avance y desarrollo de la presente investigación, se ha preparado un diagrama EDT y un diagrama de Gantt que se muestran a continuación:

3.9.1 Diagrama EDT

En la figura 13 se detalla el diagrama de estructura del trabajo que se desarrollará en la implementación del presente estudio.

Figura 13. Diagrama EDT



Nota: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

En la presente investigación se busca responder a la pregunta central: ¿Cuál es el plan de mantenimiento para los equipos críticos de distribución que mejore los niveles de disponibilidad y asegure la continuidad de la producción en Z Gas Costa Rica? Para dar respuesta a este interrogante, es indispensable realizar un diagnóstico detallado de la situación actual de los equipos críticos y del sistema de mantenimiento que los gestiona. Este diagnóstico constituye el punto de partida sobre el cual se fundamenta la propuesta de un plan de mantenimiento preventivo, ya que permite identificar con claridad las fallas más recurrentes, sus consecuencias sobre la operación y las causas que las originan. De esta forma, se establecen las bases técnicas y de gestión que orientarán la solución planteada en este trabajo.

Con ese propósito se emplean herramientas de análisis de procesos, medición de consecuencias y análisis de causas descritas en el marco teórico, tales como diagramas de flujo, diagramas SIPOC, FMEA, diagramas de Pareto e Ishikawa. Estas herramientas permiten transformar la información obtenida a partir de entrevistas, revisión de bitácoras y observación directa en evidencia estructurada, facilitando la toma de decisiones.

4.1 Descripción del Problema

El presente apartado tiene como finalidad caracterizar el problema de mantenimiento que enfrenta Z Gas Costa Rica, pasando de lo general a lo específico. Se inicia describiendo el contexto productivo de la empresa, identificando el rol de los equipos críticos en la continuidad del servicio y justificando su elección como objeto de estudio. Posteriormente, se analizan los procesos actuales de mantenimiento, los cuales presentan serias limitaciones en cuanto a planificación, documentación y disponibilidad de recursos. Este recorrido permite comprender el impacto que tiene la ausencia de un plan estructurado sobre la confiabilidad de los equipos y constituye el punto de partida para el diagnóstico integral de la investigación.

4.1.1 Contexto general del proceso productivo

La empresa Z Gas Costa Rica se dedica a la distribución de gas licuado de petróleo (GLP), un producto altamente demandado en los sectores residencial, comercial e industrial. El proceso productivo de la planta se centra en dos modalidades de servicio: el envasado de cilindros de diferentes capacidades y el trasiego a granel hacia autotanques que abastecen a clientes de gran volumen. Para ejecutar ambas operaciones, la planta depende de un conjunto de equipos críticos

compuestos por compresores, bombas y motores acoplados, cuya función es garantizar la transferencia segura y continua del producto.

Estos equipos constituyen verdaderos cuellos de botella en el proceso productivo, ya que cualquier falla o interrupción en su funcionamiento afecta de forma inmediata la capacidad de despacho. Un compresor fuera de servicio limita el llenado de los tanques de almacenamiento, mientras que una falla en bomba impediría el llenado de cilindros y autotanques, lo que compromete el suministro a hogares y pequeños negocios. En ambos casos, las consecuencias no se limitan a pérdidas económicas, sino que impactan en la imagen de la empresa, en la seguridad de la operación y en el cumplimiento de los compromisos contractuales con los clientes.

4.1.1.1 Inventario de equipos críticos de trasiego de GLP en Z Gas Costa Rica

Para ilustrar de manera clara los equipos críticos involucrados en el proceso de trasiego de GLP, se presenta el inventario de compresores y bombas junto con sus motores acoplados. Cada equipo listado es fundamental para garantizar la continuidad de las operaciones y la seguridad en la planta.

Cabe señalar que cada compresor y bomba posee su motor acoplado, el cual es indispensable para su funcionamiento. Aquellos motores que aparecen como “Placa no visible” no contaban con identificación legible al momento del diagnóstico realizado en planta.

Las bombas LGLD4 identificadas como B1 y B2 corresponden a las unidades utilizadas para el llenado de autotanques (granel), mientras que las bombas LGLD3E y LGLD3F se emplean en el llenado de cilindros comerciales y en el trasiego de gas a granel para autotanques, respectivamente. Esta información permite tener una visión completa del inventario de equipos críticos de trasiego, lo cual será referenciado posteriormente en el desarrollo del plan de mantenimiento preventivo.

Adicionalmente, en la tabla 11 se presenta un inventario detallado de los equipos críticos utilizados en el trasiego de GLP en la Planta del Coyol, incluyendo compresores, bombas y sus motores acoplados. Esta información permite visualizar de manera clara cada unidad, su función principal dentro del proceso productivo y las limitaciones observadas durante las visitas a planta, como la falta de visibilidad de algunas placas de identificación de los motores.

Tabla 11. Inventario de equipos críticos de trasiego de GLP en Z Gas Costa Rica

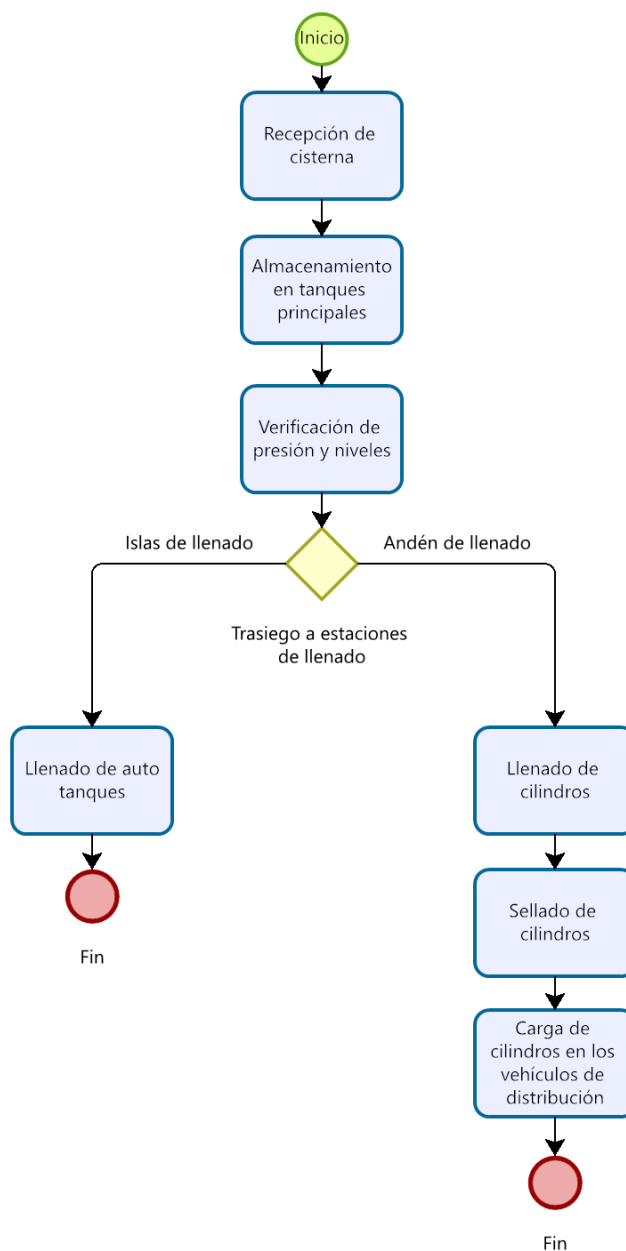
Código de equipo	Modelo	Tipo de equipo	Cantidad	Motor acoplado	Función principal
C1	Corken 691	Compresor	1	AEHHXU	Trasiego de GLP desde cisternas a tanque principal.
C2	Corken 490	Compresor	1	Placa no visible	Trasiego de GLP desde cisternas a tanque principal.
B1 y B2	Blackmer LGLD4	Bomba	2	Placa no visible	Llenado de autotanques (granel).
B3	Blackmer LGLD3E	Bomba	1	BZ610444	Llenado de cilindros comerciales.
B4	Blackmer LGLD3F	Bomba	1	CB469659	Llenado de cilindros comerciales.

Nota: Elaboración propia.

Cabe resaltar que, en la Planta del Coyoil, existe la duplicidad de equipos, significa que existe un respaldo activo y de ser requerido, utilizado, aunque esta no sea la realidad en el resto de las plantas del país, debido a eso, la criticidad de estos activos se justifica. Las plantas dependen en gran medida de la disponibilidad de cada compresor y bomba, lo que incrementa la vulnerabilidad del sistema ante cualquier avería. Por ello, en esta investigación se definió enfocar el diagnóstico y la propuesta de mejora en estos equipos, entendiendo que su gestión adecuada es clave para asegurar la continuidad de las operaciones y el cumplimiento de los estándares de seguridad que exige el manejo del GLP.

A continuación, la figura 15 muestra la secuencia de actividades que involucran el proceso de trasiego y distribución de gas LP.

Figura 15. Diagrama del proceso productivo de Z Gas Costa Rica



Nota: Elaboración propia.

Seguidamente, se describen las actividades del diagrama de procesos.

1. Inicio.
2. Recepción de cisterna: El gas LP es transportado por cisternas y recibido en la planta mediante la conexión a las líneas de descarga. Se realiza la validación documental del

proveedor, la inspección visual de la cisterna y la conexión segura al sistema de trasiego mediante mangueras y válvulas. Durante este proceso se activan los compresores Corken (modelos 691 o 490) para facilitar la transferencia del gas al tanque de almacenamiento principal por presión diferencial.

3. Almacenamiento en tanques principales: El gas LP es almacenado en tanques cilíndricos horizontales. Se monitorean continuamente los niveles, temperaturas y presiones mediante sensores integrados. Esta etapa garantiza un suministro estable para los procesos posteriores y forma parte del inventario estratégico de la planta.
4. Verificación de presión y niveles: Antes de iniciar el trasiego a las estaciones de llenado, se revisan los niveles y las presiones de los tanques de almacenamiento.
5. Trasiego a estaciones de llenado: Se activa el sistema de bombeo para llevar el gas desde los tanques hacia las diferentes estaciones de llenado. Este trasiego se realiza por líneas internas y requiere la operación de bombas Blackmer acopladas a motores Baldor. Las bombas involucradas incluyen los modelos:
 - LGLD3E y LGLD3F: Usadas para el llenado de cilindros.
 - LGLD4 (dos unidades): Usadas para el llenado de autotanques (granel). La operación de estas bombas es crítica y está condicionada al mantenimiento preventivo regular para evitar cuellos de botella en la distribución.
6. Llenado de autotanques: Los autotanques son vehículos cisterna utilizados para distribución a granel. Este proceso se realiza en las islas de llenado, donde las bombas Blackmer LGLD4 permiten trasvasar gas desde los tanques de almacenamiento a los autotanques. En esta etapa se deben seguir procedimientos estrictos de conexión, purga, control de volumen y seguridad debido al riesgo de fugas.
7. Llenado de cilindros: En la zona de llenado se colocan los cilindros de distintas capacidades (9,07 kg (20 lb), 11,34 kg (25 lb) y 15,88 kg (35 lb)) en las básculas automáticas. El operador conecta las válvulas de llenado, y una vez estabilizada la presión, se inicia la carga hasta alcanzar el peso estipulado. Se siguen protocolos de seguridad y se realiza control de fugas durante y después del llenado.

8. Sellado de cilindros: Una vez finalizado el llenado, se verifica que el peso del cilindro esté dentro de los márgenes tolerables. Los cilindros que cumplan con los estándares reciben su respectivo sello de seguridad y etiqueta con la fecha de llenado y lote. Esta etapa es fundamental para la trazabilidad del producto.
9. Carga de cilindros en los vehículos de distribución: Finalmente, los cilindros son cargados en los vehículos de distribución según las rutas programadas. Los autotankers también son despachados una vez finalizado el llenado en sus respectivas islas. El operador responsable firma el control de salida y se actualiza el inventario.
10. Fin.

Además, en la figura 16 se aprecia una vista aérea con la señalización de las áreas respectivas asociadas al proceso de trasiego y distribución de gas LP.

Figura 16. Vista Aérea de la Planta del Coyol de Alajuela



Nota: Tomado de Google Maps

- Zona 1: Área de los compresores.

- Zona 2: Área de tanques de almacenamiento.
- Zona 3: Área de bombas e islas de llenado.
- Zona 4: Andén de llenado.

4.1.2 Proceso actual de mantenimiento

Antes de detallar los hallazgos, resulta de utilidad señalar cómo funciona en la actualidad la gestión de mantenimiento en la planta. A diferencia de otras industrias que cuentan con procesos estandarizados, indicadores de desempeño y sistemas de planificación, en Z Gas Costa Rica el mantenimiento se caracteriza por un enfoque predominantemente reactivo. Esto significa que las acciones se realizan únicamente cuando ocurre una falla, sin planificación previa ni medidas de prevención.

En la práctica, cuando un equipo presenta una avería, el personal técnico procede de inmediato a repararlo. El único registro formal de estas intervenciones se lleva en un libro de actas, en el cual se anotan de manera breve la fecha y una descripción genérica de la actividad realizada. Sin embargo, no se documentan métricas clave como el tiempo fuera de servicio, los recursos utilizados, la duración de la reparación ni el nivel de impacto en la producción. Esta falta de información limita la posibilidad de analizar tendencias, calcular indicadores de confiabilidad como el MTTR o MTBF y tomar decisiones basadas en evidencia.

4.1.2.1 Hallazgos identificados

A partir de visitas a la planta en estudio, entrevistas con personal técnico y jefatura realizadas entre mayo y octubre del presente año, así como la revisión de bitácoras de mantenimiento, se identificaron los siguientes hallazgos:

1. **Predominio del mantenimiento reactivo:** Se constató que la gestión de mantenimiento en la planta es mayoritariamente reactiva. Cada vez que un equipo crítico presenta una falla, el personal procede de manera inmediata a su reparación, sin planificación ni protocolos estandarizados. Durante las entrevistas, el jefe de planta manifestó que “la mayoría de las actividades se realizan bajo presión, improvisando soluciones con lo disponible en el taller” (entrevista, 05/06/2025). Las bitácoras revisadas confirman que los registros son limitados y se reducen a la fecha y una descripción breve de la intervención, sin detallar recursos utilizados, tiempos de reparación o impacto sobre la producción.

2. **Gestión de repuestos:** El sistema actual de gestión de repuestos se basa en controles básicos que han permitido dar continuidad a las operaciones, aunque presenta oportunidades de mejora en cuanto a planificación y organización. Durante las entrevistas y la revisión de bitácoras se observó que, en algunos casos, la reposición de piezas críticas depende de solicitudes reactivas y no de un inventario mínimo predefinido. La modernización de este proceso mediante un control más estandarizado y predictivo permitiría reducir tiempos de espera, mejorar la disponibilidad de repuestos estratégicos y optimizar el desempeño del área de mantenimiento.
3. **Limitaciones en la estandarización de procedimientos:** Si bien la planta cuenta con prácticas operativas que guían la instalación, inspección y reparación de los equipos críticos, estas no se encuentran plenamente documentadas ni estandarizadas bajo un enfoque moderno de gestión de mantenimiento. Actualmente, la ejecución depende en gran medida de la experiencia y criterio individual de cada técnico, lo cual puede generar variaciones en los resultados. Las entrevistas con el personal de mantenimiento reflejaron que esta situación limita la uniformidad en las intervenciones y reduce la posibilidad de replicar mejores prácticas de manera consistente, incrementando con ello la vulnerabilidad del sistema frente a interrupciones no planificadas.
4. **Capacitación y disponibilidad de personal técnico:** La planta opera con aproximadamente un 40% menos de personal de mantenimiento especializado en equipos de GLP del requerido, lo que genera sobrecarga laboral y dependencia de apoyo externo proveniente de otras plantas. Durante las visitas, se observó que los técnicos dedican gran parte de su tiempo a atender emergencias, relegando actividades preventivas. Esta situación afecta tanto la eficiencia del taller como la capacidad de respuesta ante fallas imprevistas. Además, se identificó que no existen programas sistemáticos de capacitación continua, lo que limita la actualización de competencias técnicas del personal.
5. **Desgaste de equipos y gestión del historial técnico:** Algunos de los equipos críticos presentan desgaste acumulado y carecen de un historial técnico actualizado que permita planificar intervenciones preventivas o predecir necesidades de reemplazo. Durante la revisión de bitácoras, se identificaron registros incompletos que impiden establecer tendencias de fallas o medir la vida útil restante de los componentes.

6. Indicadores de gestión del mantenimiento: No se registran métricas de confiabilidad ni indicadores de desempeño de los equipos, como MTTR (tiempo medio de reparación), MTBF (tiempo medio entre fallas) o disponibilidad operativa. Esta falta de información objetiva limita la capacidad de la gerencia para priorizar inversiones, planificar mantenimientos preventivos y medir la efectividad de las acciones realizadas.
7. Impacto operacional, económico y de seguridad: La falta de planificación y protocolos tiene consecuencias significativas. Operativamente, se producen interrupciones frecuentes en trasiego y llenado de cilindros, afectando la continuidad del suministro. Económicamente, la empresa estima pérdidas de ₡55 millones por cada día de paro en la planta del Coyal. Organizacionalmente, se observa dependencia de personal de otras plantas. Finalmente, la ausencia de protocolos y controles aumenta los riesgos de seguridad al trabajar con GLP, un producto altamente inflamable.

4.1.2.2 Fallas identificadas en los equipos críticos

Durante el diagnóstico realizado a los equipos críticos de trasiego en Z Gas Costa Rica, se identificaron diversas fallas recurrentes a partir del análisis de las bitácoras de mantenimiento, observaciones de campo y entrevistas al personal técnico. Estas fallas representan las principales causas de indisponibilidad operativa y constituyen un riesgo para la continuidad del proceso de distribución de gas LP.

En el caso de los compresores Corken (modelos 691 y 490), las fallas más frecuentes corresponden a fugas de aceite en los sellos, sobrecalentamiento por deficiencia en la lubricación y vibraciones excesivas ocasionadas por desalineación en el acople con el motor. Dichas fallas generan paros no programados y disminuyen la eficiencia del proceso de trasiego.

Con respecto a las bombas Blackmer (modelos LGLD4, LGLD3E y LGLD3F), se detectaron fallas vinculadas al desgaste prematuro de rodamientos, deterioro en las empaquetaduras y cavitación producto de una succión inadecuada. Estas condiciones provocan reducción en el caudal de bombeo y pérdida de presión en las líneas de trasiego, afectando directamente la capacidad de despacho.

En cuanto a los motores acoplados (modelos Baldor y AEHHXU), las fallas más comunes se relacionan con recalentamiento por deficiencia en la ventilación, variaciones de voltaje en la red eléctrica y deterioro en los aislamientos. Estas fallas incrementan el riesgo de fallos eléctricos mayores y comprometen la operación continua de los equipos de trasiego.

La identificación de estas fallas pone en evidencia la necesidad de contar con un plan de mantenimiento preventivo y correctivo estructurado, que permita disminuir la ocurrencia de averías críticas, aumentar la confiabilidad de los equipos y asegurar la disponibilidad operativa del sistema de distribución de gas LP.

Un ejemplo concreto de las consecuencias de este sistema fue el incidente ocurrido con una bomba de trasiego Blackmer en el mes de julio. Tras una reparación, la bomba fue reinstalada con un componente mal colocado, lo que ocasionó un bloqueo en el flujo de gas y obligó a detener nuevamente el equipo para corregir la falla. Este hecho no solo interrumpió la operación por más tiempo del previsto, sino que también puso en evidencia la ausencia de procedimientos estandarizados de instalación, la falta de controles de calidad en las reparaciones y la carencia de capacitación sistemática para el personal técnico.

La Tabla 12 se muestra un diagrama de SIPOC del proceso actual de mantenimiento en Z Gas Costa Rica.

Tabla 12. Diagrama SIPOC simplificado del proceso de mantenimiento reactivo en Z Gas Costa Rica

S	I	P	O	C
Proveedores	Entradas	Proceso	Salida	Cliente
Bodega, personal de mantenimiento, jefatura	Repuestos solicitados al momento, personal disponible	Falla ↓ Intervención ↓ Registro en acta	Equipo reparado temporalmente, fallas recurrentes	Planta de distribución, clientes de Z Gas

Nota: Elaboración propia.

En resumen, el sistema de mantenimiento en Z Gas Costa Rica carece de planificación preventiva, protocolos estandarizados, indicadores de desempeño y gestión de repuestos eficiente. Estas deficiencias, sumadas a la reducción de personal, generan un entorno en el cual los equipos críticos operan en condiciones de alta vulnerabilidad. El diagnóstico de estas debilidades resulta indispensable para comprender las consecuencias y causas que se desarrollarán en las secciones siguientes, y para fundamentar la necesidad de un plan de mantenimiento que permita transformar este enfoque reactivo en uno preventivo y planificado.

4.2 Medición de las consecuencias

El análisis de las consecuencias derivadas de las fallas en los equipos críticos de distribución constituye un elemento central para comprender la magnitud del problema y justificar la necesidad de un plan de mantenimiento estructurado. Aunque las bitácoras revisadas no registran indicadores precisos como tiempos de inactividad, duración de reparaciones o frecuencia de fallas, las entrevistas con el personal de mantenimiento y gerencia, junto con la observación directa, permiten identificar efectos significativos en el plano operativo, económico, organizacional y de seguridad. Estas consecuencias no solo afectan la continuidad del servicio, sino que también comprometen la confiabilidad del sistema productivo y generan riesgos que podrían tener repercusiones graves en el futuro si no se atienden de manera oportuna.

En primer lugar, la consecuencia más evidente es la pérdida operativa asociada a la interrupción de los procesos de trasiego y envasado. El hecho de que un compresor o una bomba se encuentre fuera de servicio implica que la planta no puede mantener su capacidad de producción habitual, lo que repercute directamente en la atención a clientes. Según la información proporcionada por la gerencia, un día de paralización en las operaciones de trasiego puede significar pérdidas millonarias en ventas, tanto en granel como en cilindros, afectando no solo los ingresos inmediatos, sino también la confianza de los clientes en la capacidad de respuesta de la empresa. Este tipo de impactos financieros, aunque no cuantificados en registros detallados, resultan determinantes para comprender la importancia de asegurar la disponibilidad de los equipos críticos.

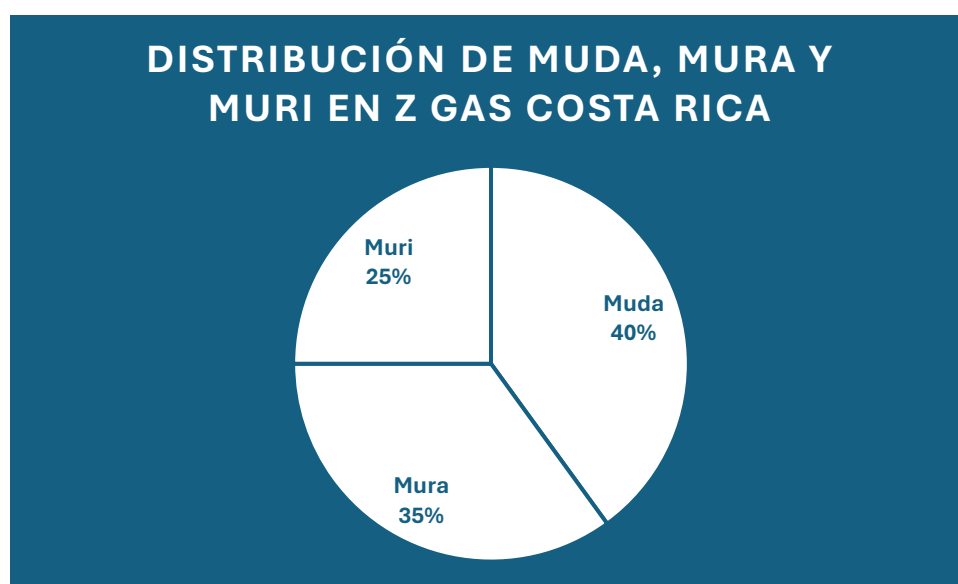
Además de las pérdidas económicas, existe una consecuencia operativa vinculada al uso ineficiente de los recursos humanos. La falta de planificación preventiva genera una dinámica en la que el personal de mantenimiento debe interrumpir sus labores regulares para atender emergencias. Esto no solo provoca reprocesos y pérdida de horas hombre, sino que también incrementa la presión sobre un departamento no opera en la totalidad de su capacidad de personal. En este escenario, las fallas recurrentes se convierten en una carga adicional que limita la eficiencia global del taller y reduce su capacidad de respuesta frente a imprevistos.

Desde el enfoque de Lean Management, se identificaron tres categorías principales: Muda (desperdicios), Mura (irregularidades) y Muri (sobrecarga). Con base en las entrevistas realizadas al personal de mantenimiento y jefatura, así como en la revisión de las bitácoras disponibles, se estimó que los tiempos de espera por falta de repuestos y personal externo representan la mayor

proporción de problemas, correspondiendo aproximadamente a un 40%. Por su parte, la irregularidad en la programación de tareas, reflejada en la atención reactiva de emergencias, se estimó en un 35%. Finalmente, la sobrecarga del personal y las reparaciones improvisadas fueron valoradas en un 25%. Estos valores, aunque no exactos, constituyen una aproximación fundamentada en la evidencia recolectada y permiten dimensionar el impacto de los desperdicios en la gestión de mantenimiento actual.

A continuación, en la figura 17 se grafica la muda, mura y muri en Z Gas Costa Rica

Figura 17. Muda, Mura y Muri en Z Gas Costa Rica



Nota: Elaboración propia.

Las consecuencias no se limitan al plano operativo y financiero, sino que se extienden a aspectos legales, ambientales y de seguridad. El manejo del GLP exige altos estándares de control debido a su naturaleza inflamable y explosiva. Una falla en equipos de trasiego no solo detiene la operación, sino que puede derivar en fugas o situaciones de riesgo que comprometen la integridad de los trabajadores y la seguridad de la planta. En este sentido, la ausencia de protocolos de instalación y control de calidad en reparaciones incrementa el nivel de exposición a incidentes mayores, los cuales podrían acarrear sanciones regulatorias y afectar la reputación corporativa de la empresa.

La Tabla 13 muestra con mayor claridad la clasificación de consecuencias de fallas en los equipos críticos

Tabla 13. Clasificación de las consecuencias de una falla de un equipo crítico

Clasificación	Consecuencias
Operativas	Disminución de capacidad de trasiego y envasado.
Financieras	Pérdidas por interrupción de ventas.
Organizacionales	Dependencia de personal externo y desmotivación del equipo.
Legales	Sanciones por incumplimiento de normas de seguridad.
Ambientales	Riesgo de fugas y contaminación.

Nota: Elaboración propia.

Otro aspecto importante es el impacto organizacional derivado de la falta de registros detallados. Al no contar con información sistemática sobre tiempos de falla y reparación, la gerencia no puede medir con precisión indicadores de gestión ni proyectar necesidades de inversión en mantenimiento. Esto genera una toma de decisiones reactiva, donde las prioridades se establecen en función de la emergencia del momento y no de un análisis técnico de riesgos y costos. La consecuencia es una gestión limitada en su capacidad de planificación, que depende más de la experiencia empírica del personal que de datos objetivos que permitan justificar mejoras o inversiones.

Por último, debe señalarse que estas consecuencias se retroalimentan en un ciclo que incrementa progresivamente la vulnerabilidad del sistema. Cada interrupción de un equipo crítico no solo genera pérdidas inmediatas, sino que también aumenta la presión sobre el personal, obliga a trabajar en condiciones adversas y expone a la planta a riesgos mayores. Este ciclo negativo, si no se rompe mediante un plan de mantenimiento estructurado, puede derivar en fallas de mayor escala que afecten no solo la continuidad de la producción, sino también la seguridad global de la operación.

En síntesis, las consecuencias identificadas muestran que la ausencia de un plan preventivo y de protocolos de mantenimiento no es un problema menor, sino una condición estructural que impacta en múltiples dimensiones de la empresa. Estas pérdidas y riesgos justifican la necesidad de un

diagnóstico más profundo de las causas que generan las fallas, el cual se desarrolla en la siguiente sección.

4.3 Análisis de las causas

El análisis de las causas constituye una etapa fundamental en el diagnóstico porque permite comprender por qué los equipos críticos de Z Gas Costa Rica presentan fallas recurrentes y por qué el sistema de mantenimiento no logra garantizar su confiabilidad. Desde el enfoque de la ingeniería industrial, este apartado busca identificar los factores raíz que explican la situación actual, organizarlos en categorías y priorizarlos en función de su impacto. Para ello, se aplican herramientas como el diagrama de Ishikawa, el análisis de Pareto y la técnica de los 5 Porqués, las cuales facilitan la identificación de relaciones causa-efecto y permiten orientar la propuesta de mejora hacia los aspectos más determinantes.

En primera instancia, el diagrama de Ishikawa permitió agrupar las causas en seis categorías: métodos, mano de obra, materiales, maquinaria, medio ambiente y medición. En el área de métodos, la principal debilidad es la ausencia de protocolos estandarizados para la ejecución de tareas de mantenimiento. Actualmente, no existe un procedimiento escrito que detalle cómo realizar una instalación, una inspección o una reparación, lo que genera resultados desiguales y una alta dependencia de la experiencia individual de cada técnico. Esta falta de estandarización se evidenció claramente en el incidente con la bomba de trasiego, donde una instalación incorrecta obligó a detener nuevamente el equipo y afectó la continuidad del servicio.

En lo que respecta a la mano de obra, se identificó que la planta opera con un 40% menos de personal de mantenimiento del requerido, lo que genera sobrecarga de trabajo y dependencia del apoyo de técnicos de otras plantas. A esto se suma una curva de aprendizaje lenta, producto de la falta de programas de capacitación continua que fortalezcan las competencias técnicas del personal. La consecuencia de esta situación es que los errores humanos, derivados tanto de la presión por restablecer rápidamente los equipos como de la falta de conocimientos actualizados, se convierten en un factor recurrente en la aparición de fallas.

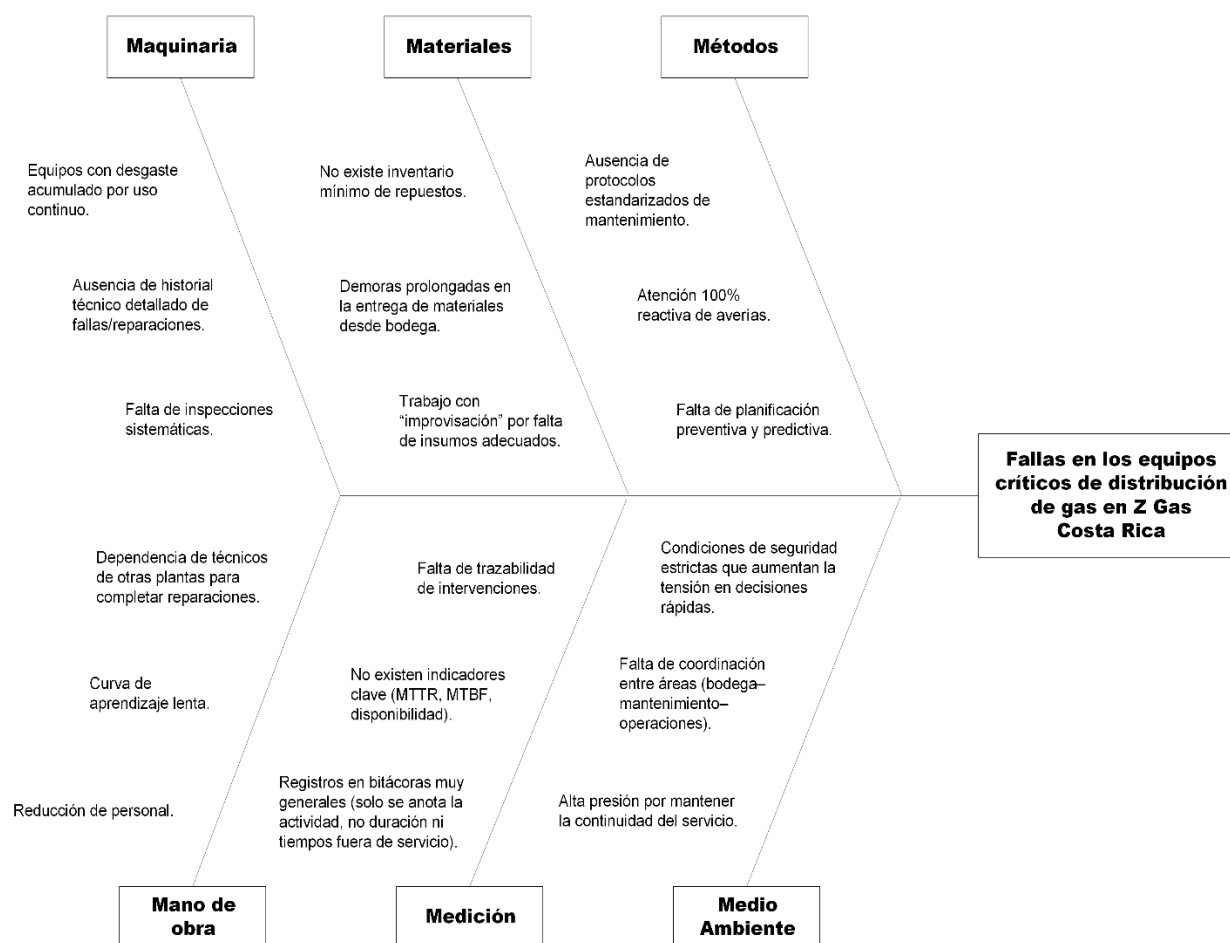
En la categoría de materiales, la principal causa es la inexistencia de un inventario mínimo de repuestos. El modelo actual, basado en solicitar a bodega los componentes solo después de ser utilizados, genera tiempos muertos y obliga a improvisar reparaciones con piezas reusadas. Esta práctica no solo prolonga la inactividad de los equipos, sino que incrementa el riesgo de fallas

repetitivas al no contar con repuestos en condiciones óptimas. En la categoría de maquinaria, se observa que varios equipos presentan desgaste acumulado y carecen de un historial técnico actualizado que permita proyectar necesidades de sustitución o intervenciones mayores.

Por otro lado, en la categoría de medio ambiente, se identificó que la presión por mantener la continuidad del servicio y cumplir con los altos estándares de seguridad del GLP genera un entorno de trabajo estresante, en el cual las decisiones tienden a priorizar la inmediatez por encima de la calidad técnica. Finalmente, en la categoría de medición, la inexistencia de indicadores como MTTR, MTBF o disponibilidad de equipos impide evaluar objetivamente la efectividad de las acciones de mantenimiento y limita la posibilidad de gestionar la mejora continua.

A continuación, se presenta la figura 18, donde se visualiza el Diagrama de Ishikawa que resume los factores identificados durante el diagnóstico:

Figura 18. Diagrama de Ishikawa

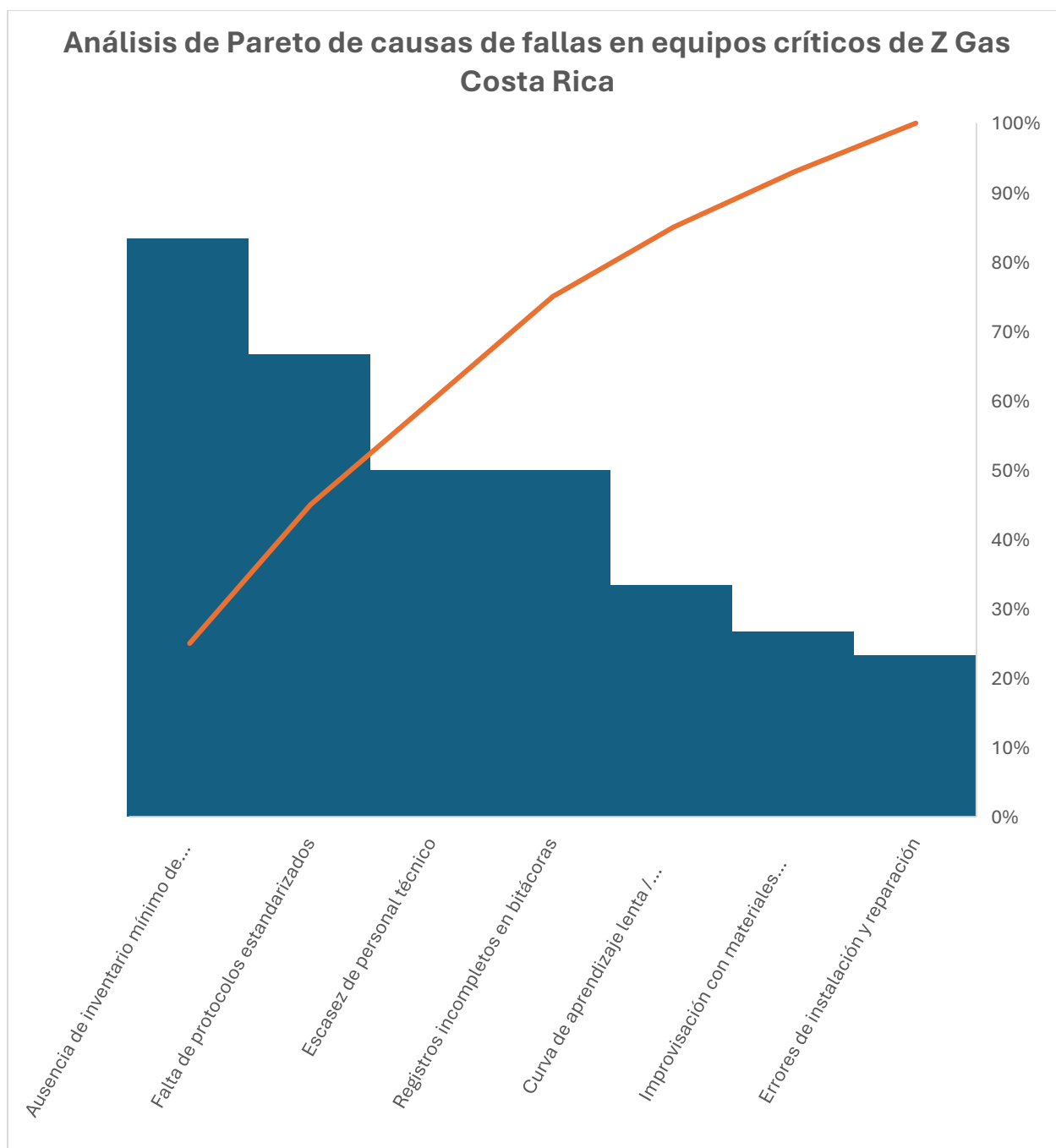


Nota: Elaboración propia.

El incidente de la bomba mal instalada es un ejemplo que refleja cómo estas causas interactúan entre sí. La falta de capacitación (mano de obra), la ausencia de un procedimiento estandarizado de instalación (métodos) y la presión por reanudar rápidamente el trasiego (medio ambiente) confluyeron en un error que interrumpió nuevamente la operación. Este caso demuestra que no se trata de fallas aisladas, sino de un sistema con múltiples vulnerabilidades que aumentan la probabilidad de ocurrencia de incidentes.

Para priorizar las causas identificadas, se aplicó el análisis de Pareto. Los resultados mostrados en la figura 19 indican que aproximadamente el 20% de las causas explican el 80% de los problemas observados. Las principales causas son: 1. La falta de inventario mínimo de repuestos. 2. La ausencia de protocolos estandarizados y 3. La escasez de personal técnico. Estas tres causas concentran la mayor parte de las consecuencias negativas en términos de tiempos de inactividad, errores de reparación y riesgos de seguridad.

Figura 19. Análisis de Pareto



Nota: Elaboración propia.

Complementariamente, la técnica de los 5 Porqués permite profundizar en estas causas. Por ejemplo, ante la pregunta de por qué no se cuenta con inventario mínimo, se identificó que la política de la empresa se basa en evitar costos de almacenamiento; al preguntar por qué se sigue esa política, se encontró que no existen indicadores que permitan cuantificar las pérdidas generadas por los tiempos de espera; y al indagar aún más, se evidenció que la ausencia de datos históricos

confiables limita la capacidad de justificar cambios en la política. Este ejercicio revela que la raíz del problema no está solo en la falta de repuestos, sino en la carencia de información objetiva que soporte decisiones estratégicas de abastecimiento.

La Tabla 14 brinda una mejor comprensión de este análisis.

Tabla 14. Análisis 5W-2H

Pregunta	Respuesta
¿Qué ocurre? (What)	Fallas en los equipos críticos de distribución (compresores, bombas y motores acoplados) que generan interrupciones en el trasiego de gas LP. El mantenimiento actual es reactivo, sin protocolos ni indicadores de gestión.
¿Por qué ocurre? (Why)	Por ausencia de inventario mínimo de repuestos, falta de estandarización de procedimientos, escasez de personal capacitado, registros incompletos y presión operativa que obliga a improvisar soluciones rápidas.
¿Dónde ocurre? (Where)	En el área de mantenimiento de la planta de distribución de Z Gas Costa Rica, específicamente en el taller de mantenimiento y en las estaciones de trasiego donde se ubican los equipos críticos.
¿Cuándo ocurre? (When)	Cada vez que un equipo crítico presenta averías, lo cual sucede de forma no planificada. Se reportan paros imprevistos, como el caso de la bomba de trasiego mal instalada que tuvo que detenerse dos veces en un corto periodo.
¿Quiénes están involucrados? (Who)	Personal de mantenimiento, jefatura de planta, personal de otras plantas que apoya en reparaciones, y la gerencia al tomar decisiones sobre recursos y tiempos.
¿Cómo ocurre? (How)	El proceso de atención es reactivo: se detiene el equipo, se inicia reparación inmediata con lo disponible, se solicita repuesto a bodega solo

	después de usar el último en existencia, y se improvisa con materiales reusados mientras llega el nuevo componente.
¿Cuánto impacta? (How much)	El impacto se refleja en pérdidas operativas millonarias por cada día de paro (€55 millones estimados por jornada sin producción), en riesgos de seguridad al trabajar bajo presión y en ineficiencia de recursos humanos y materiales.

Nota: Elaboración propia.

De forma similar, al analizar la falta de protocolos estandarizados, los 5 Porqués demuestran que la empresa nunca ha implementado un sistema formal de gestión de mantenimiento; al preguntar por qué, surge que la gestión ha sido históricamente reactiva y centrada en resolver emergencias; y al profundizar, se identifica que no existió una visión de la criticidad de los equipos en el contexto productivo. En este sentido, la propuesta de un plan de mantenimiento no solo busca atender el problema operativo, sino también transformar la cultura organizacional hacia una gestión basada en prevención y datos objetivos.

El análisis de las causas señala que el sistema de mantenimiento actual en Z Gas Costa Rica presenta limitaciones estructurales que trascienden la asignación de recursos, y requieren un replanteamiento integral de su gestión operativa. Entre los factores más relevantes se identifican la ausencia de un inventario mínimo de repuestos, la falta de procedimientos estandarizados y la necesidad de fortalecer las competencias técnicas del personal.

Consecuentemente, atender esos aspectos enumerados resulta esencial para garantizar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos críticos. Los hallazgos constituyen la base técnica sobre la cual se diseña la propuesta de plan de mantenimiento preventivo presentada en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO V. PROPUESTA

En el presente capítulo se desarrolla la propuesta de un plan de mantenimiento estructurado para los equipos críticos de distribución en Z Gas Costa Rica, con el propósito de responder la pregunta central de esta investigación: ¿Cuál es el plan de mantenimiento para los equipos críticos de distribución que mejore los niveles de disponibilidad y aseguramiento de la producción en Gas Z Costa Rica?

La respuesta a esta interrogante se fundamenta en los hallazgos mostrados en el Capítulo IV, con los que se identificó que la gestión de mantenimiento actual de la empresa se apoya principalmente en la atención correctiva de fallas, lo que significa un esquema habitual en muchas plantas industriales que priorizan la continuidad operativa inmediata sobre la planificación a largo plazo. Asimismo, se observó que algunos procesos aún no cuentan con protocolos formalizados ni con registros estandarizados, lo cual abre la oportunidad de implementar herramientas documentales que permitan uniformar los criterios de trabajo. En el ámbito de la gestión de repuestos, se detectaron oportunidades de mejora relacionadas con la clasificación y control de existencias, mientras que en el recurso humano se evidenció que la carga de trabajo puede optimizarse mediante una mejor programación de actividades.

Esas características reflejan que la organización dispone de una base operativa funcional, pero con un potencial significativo de fortalecimiento en términos de planificación, estandarización y control. De allí que la propuesta presentada en este capítulo no se limite a plantear rutinas de mantenimiento, sino que busque instaurar un sistema integral que contemple herramientas documentales, procedimientos estandarizados, planes operativos y mecanismos de seguimiento que favorezcan la evolución hacia un mantenimiento planificado y sostenible.

La propuesta se compone de cinco elementos principales: fichas técnicas de los equipos críticos, un plan de mantenimiento preventivo y correctivo, un manual de mantenimiento con procedimientos estandarizados, un cronograma anual de actividades y un manual de procesos específico para la atención de fallas. Estos instrumentos fueron diseñados tomando en cuenta las condiciones actuales de la planta, los recursos disponibles y las mejores prácticas internacionales en gestión de activos, como las recomendadas en la norma ISO 55000 y en las guías de recopilación de datos de confiabilidad de ISO 14224. La documentación completa se adjunta en los apéndices

de esta tesis, mientras que en este capítulo se incluyen ejemplos representativos y cuadros de síntesis que ilustran el alcance y la aplicabilidad del plan.

5.1 Propuesta

La solución técnica planteada en este capítulo responde directamente a los hallazgos descritos en el Capítulo IV de esta investigación y se enfoca en corregir las deficiencias detectadas en la gestión de mantenimiento de los equipos críticos de Z Gas Costa Rica. El diagnóstico previo evidenció que la organización opera con un mantenimiento reactivo, dependiente de la disponibilidad de personal, de la llegada tardía de repuestos y de prácticas improvisadas que aumentan la probabilidad de fallas. En consecuencia, la propuesta no se limita a enunciar actividades de mantenimiento, sino que establece un sistema integral documentado y estandarizado que garantice mayor disponibilidad operativa, confiabilidad en las reparaciones y seguridad en las operaciones de trasiego y envasado de gas.

5.1.1 Requerimientos para su implementación



La implementación del plan requiere de condiciones mínimas para asegurar su sostenibilidad. En primer lugar, es necesario establecer un inventario mínimo de repuestos críticos, ya que las bitácoras mostraron que la falta de disponibilidad genera esperas prolongadas y reparaciones improvisadas. Asimismo, debe disponerse de al menos una base documental organizada en formato físico y digital que consolide fichas técnicas, procedimientos, cronogramas y reportes de intervención, superando así el actual registro limitado en un libro de actas. Por último, se requiere fortalecer la capacitación del personal de mantenimiento, de manera que puedan ejecutar las rutinas con base en protocolos estandarizados, reduciendo la dependencia de personal de otras plantas. Estos tres requerimientos: inventario mínimo, control documental y capacitación, constituyen la base sobre la cual se construye la propuesta.

5.1.2 Fichas técnicas de equipos críticos

Como primer paso de la propuesta se elaboraron fichas técnicas para los equipos críticos de la planta, entre ellos los compresores Corken, las bombas Blackmer y los motores Baldor. Estas fichas reúnen información clave como el código del equipo, sus principales características técnicas, la frecuencia de las actividades de mantenimiento y los recursos necesarios para ejecutarlas. El objetivo es facilitar al personal una herramienta práctica y estandarizada para conocer las especificaciones de cada equipo antes de realizar cualquier intervención.

En las siguientes figuras 20 y 21 se logra apreciar una propuesta de la posible ficha técnica por utilizar en la empresa.

Figura 20. Fichas Técnicas Equipos Críticos

		Fichas Técnicas Equipos		
		Empresa:	Gas Nacional Zeta	
Planta:		Coyol	Elaborado por: Steven Retana	
Departamento:		Operaciones		
MAQUINA/EQUIPO:	Bomba Blackmer LGLD4 + Motor Baldor XXXX		AREA DE PROCESO:	Trasiego
FUNCIÓN:	Impulsión de GLP desde tanque al andén o islas de llenado			
MARCA/FABRICANTE:	Blackmer	Visible:	X	
		No Visible		
TIPO/MODELO/VERSION:	LGLD4	Visible:	X	
		No Visible		
Nº SERIE:	511965-X	Visible:	X	
		No Visible		
AÑO DE FABRICACIÓN:	x	Visible:		
		No Visible	X	
Nº/CODIGO ACTIVO:	GO-C-0001-BOM y GO-C-0003-MOT			
DIMENSIONES GENERAL:	85 cm x 45 cm			
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y COMPONENTES COMPLEMENTARIOS:	<p>Bomba de paletas deslizantes modelo LGLD4, diseñada para el manejo eficiente de gas licuado de petróleo (GLP), propano, butano y amoníaco anhidro en aplicaciones de alto caudal. Construida en hierro dúctil ASTM 536, cuenta con rotor robusto, camisa de hierro fundido y eje de acero de alta resistencia. Está equipada con paletas Duravane autocompensables que aseguran un rendimiento constante y prolongan la vida útil del equipo. Soporta una presión máxima de trabajo de 350 psi y una presión diferencial de hasta 150 psi. Su rango de caudal operativo se sitúa entre 150 y 370 GPM (568–1.400 L/min), con un rango de temperatura de servicio de -32 °C a 115 °C. Integra sello mecánico tipo Blackmer, válvula de alivio interna regulable, y conexiones de entrada lateral y salida superior. Se monta sobre base rígida y permite el acoplamiento a motores industriales trifásicos, adaptándose a entornos de operación exigentes como plantas de llenado y sistemas de descarga de GLP.</p>			
REQ. ELÉCTRICOS:	Motor acoplado externo (no especificado en esta unidad)			
ESTADO CONSERV.:	Equipo en buen estado de conservación y funcionamiento.			
EDAD AÑOS:	NA	VALOR ESTIMADO:		
NOTA IMPORTANTE:	<p>La placa de fabricante del motor no es visible, por ende, no es posible recolectar más datos de los que se obtuvieron</p>			

Nota: Elaboración propia.

Figura 21. Fichas Técnicas Equipos Críticos

	Fichas Técnicas Equipos			
	Empresa:	Gas Nacional Zeta		Ver: 1.0
	Planta:	Coyol		Elaborado por: Steven Retana
	Departamento:	Operaciones		

FOTO 1: PLACA DEL FABRICANTE		FOTO 2: PLACA DEL FABRICANTE
		
FOTO 3: PANORÁMICA		
		

Nota: Elaboración propia.

Las fichas técnicas elaboradas para los equipos críticos de trasiego en la Planta de Coyol constituyen un instrumento esencial dentro de la propuesta, dado que concentran la información técnica y operativa de cada unidad funcional, entendida como la integración de la bomba y el motor. Su finalidad no se limita a un registro administrativo, sino que responde a la necesidad de documentar de manera estandarizada los parámetros fundamentales que servirán como insumo para la gestión del mantenimiento.

En primera instancia, las fichas incluyen los datos de identificación de cada equipo, tales como nombre, código interno y área de proceso, lo cual garantiza la trazabilidad y facilita la integración en el plan de mantenimiento. En este caso, la codificación GO-C-0001-BOM y GO-C-0003-MOT

corresponde a la bomba Blackmer modelo LGLD4 y a su motor Baldor asociado, registrándolos como un solo conjunto de trasiego. Seguidamente, se incorpora la descripción de la función del equipo, en la que se señala su papel en la impulsión de gas licuado de petróleo (GLP) desde los tanques hasta los andenes o islas de llenado. Este campo permite establecer la relación directa entre la operación del equipo y la continuidad del proceso de distribución, demostrando la criticidad que lo convierte en objeto de esta propuesta.

Asimismo, se documentan aspectos como la marca, el modelo y el número de serie, elementos que son indispensables para la consulta de manuales técnicos, la adquisición de repuestos originales y la aplicación de las especificaciones de fábrica en los procedimientos de mantenimiento. A estos datos se añaden la información relativa al año de fabricación y el estado de conservación, con lo cual se pretende estimar la vida útil y orientar decisiones futuras de rehabilitación o sustitución.

Otro apartado de gran relevancia corresponde a las características técnicas, donde se consignan parámetros como la presión máxima de trabajo, el caudal operativo y el rango de temperatura de servicio. Estos valores definen los límites de seguridad y rendimiento del equipo, sirviendo como referencia para el diseño de rutinas de inspección y monitoreo. En concordancia con lo anterior, también se detallan los componentes complementarios, entre los que destacan las paletas Duravane, el sello mecánico y la válvula de alivio. El registro de estos elementos permite prever los puntos más vulnerables a fallas y establecer las piezas que deben considerarse dentro del inventario de repuestos críticos.

Por otra parte, se incluyen los requerimientos eléctricos y el motor acoplado, información que resulta crucial al tratarse de unidades funcionales en las que el desempeño de la bomba depende directamente de la confiabilidad del motor. Si bien en esta ficha no fue posible recuperar todos los datos de la placa del motor Baldor, su inclusión evidencia la importancia de documentar la totalidad del conjunto y sienta las bases para complementar la información en futuras actualizaciones. De igual manera, se incorporan las dimensiones generales y el tipo de montaje sobre base rígida, ya que estos aspectos tienen incidencia en la planificación de intervenciones, en el espacio requerido para maniobras de mantenimiento y en la logística de repuestos.

Finalmente, las fichas contemplan un registro fotográfico que respalda visualmente los datos levantados, facilitando la identificación en campo de cada unidad. Este recurso cobra especial

relevancia cuando las placas del fabricante no son completamente legibles, como sucedió en el caso del motor, y se convierte en un apoyo para los técnicos durante las inspecciones.

5.1.3 Plan de mantenimiento preventivo

El segundo componente de la propuesta es el plan de mantenimiento, diseñado con base en las necesidades detectadas en la planta y en las mejores prácticas de gestión industrial. El plan contempla actividades preventivas con diferentes frecuencias (diaria, semanal, mensual, semestral y anual), además de procedimientos correctivos para atender fallas puntuales. Una característica clave del plan es que las actividades semanales se programan dos veces por semana, dividiendo proporcionalmente la carga horaria para mantener un control constante sin incrementar las horas-hombre totales.

A continuación, en la tabla 15 se muestra el Plan de Mantenimiento Preventivo

Tabla 15. Plan de Mantenimiento Preventivo

ITEM	EQUIPO	CÓDIGO INTERNO	CÓDIGO ACTIVIDAD	ACTIVIDAD	FRECUENCIA
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C1	Medir presión de aceite cárter	Diario
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C2	Medir presión de descarga	Diario
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C3	Revisión visual general	2 veces por semana
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C4	Verificar nivel de aceite del cárter	Mensual
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C5	Drenar líquidos acumulados	2 veces por semana
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C6	Drenar distanciadores	2 veces por semana
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C7	Limpiar áreas de enfriamiento	Mensual
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C8	Revisar tanque de lubricante	Mensual
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C9	Verificar tensión de correas	Mensual
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C10	Inspección ensamble de válvulas	Semestral
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C11	Lubricar rodamientos del motor	Semestral
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C12	Verificar puntos eléctricos del motor	Anual
1	Compresor 691	GO-C-0001-COM	C13	Inspección anillos del pistón	Semestral
2	Motor AEHHXU	GO-C-0001-MOT	M1	Inspección visual y auditiva	2 veces por semana
2	Motor AEHHXU	GO-C-0001-MOT	M2	Verificación de conexiones eléctricas	Mensual
2	Motor AEHHXU	GO-C-0001-MOT	M3	Limpieza de ventilación exterior	2 veces por semana
2	Motor AEHHXU	GO-C-0001-MOT	M4	Lubricación de rodamientos	Semestral
2	Motor AEHHXU	GO-C-0001-MOT	M5	Prueba de resistencia de aislamiento	Anual
2	Motor AEHHXU	GO-C-0001-MOT	M6	Verificación de vibraciones y ruidos	2 veces por semana
3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C1	Medir presión de aceite cárter	Diario
3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C2	Medir presión de descarga	Diario
3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C3	Revisión visual general	2 veces por semana

3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C4	Verificar nivel de aceite del cárter	Mensual
3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C5	Drenar líquidos acumulados	2 veces por semana
3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C6	Drenar distanciadores	2 veces por semana
3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C7	Limpiar áreas de enfriamiento	Mensual
3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C8	Revisar tanque de lubricante	Mensual
3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C9	Verificar tensión de correas	Mensual
3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C10	Inspección ensamble de válvulas	Semestral
3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C11	Lubricar rodamientos del motor	Semestral
3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C12	Verificar puntos eléctricos del motor	Anuual
3	Compresor 490	GO-C-0002-COM	C13	Inspección anillos del pistón	Semestral
4	Motor No Identificado	GO-C-0002-MOT	M1	Inspección visual y auditiva	2 veces por semana
4	Motor No Identificado	GO-C-0002-MOT	M2	Verificación de conexiones eléctricas	Mensual
4	Motor No Identificado	GO-C-0002-MOT	M3	Limpieza de ventilación exterior	2 veces por semana
4	Motor No Identificado	GO-C-0002-MOT	M4	Lubricación de rodamientos	Semestral
4	Motor No Identificado	GO-C-0002-MOT	M5	Prueba de resistencia de aislamiento	Anuual
4	Motor No Identificado	GO-C-0002-MOT	M6	Verificación de vibraciones y ruidos	2 veces por semana
5	Bomba LGLD4	GO-C-0001-BOM	B1	Limpieza y revisión de filtros	Semanal
5	Bomba LGLD4	GO-C-0001-BOM	B2	Lubricar rodamientos	Mensual
5	Bomba LGLD4	GO-C-0001-BOM	B3	Inspección de paletas (vanes)	Semestral
5	Bomba LGLD4	GO-C-0001-BOM	B4	Verificar conexiones y sellos	Mensual
5	Bomba LGLD4	GO-C-0001-BOM	B5	Inspección general de la bomba	Semestral
5	Bomba LGLD4	GO-C-0001-BOM	B6	Verificar alineación con el motor	Semestral
6	Motor No Identificado	GO-C-0003-MOT	M1	Inspección visual y auditiva	2 veces por semana
6	Motor No Identificado	GO-C-0003-MOT	M2	Verificación de conexiones eléctricas	Mensual
5	Motor No Identificado	GO-C-0003-MOT	M3	Limpieza de ventilación exterior	2 veces por semana
6	Motor No Identificado	GO-C-0003-MOT	M4	Lubricación de rodamientos	Semestral
6	Motor No Identificado	GO-C-0003-MOT	M5	Prueba de resistencia de aislamiento	Anuual
6	Motor No Identificado	GO-C-0003-MOT	M6	Verificación de vibraciones y ruidos	2 veces por semana
7	Bomba LGLD4	GO-C-0002-BOM	B1	Limpieza y revisión de filtros	Semanal
7	Bomba LGLD4	GO-C-0002-BOM	B2	Lubricar rodamientos	Mensual
7	Bomba LGLD4	GO-C-0002-BOM	B3	Inspección de paletas (vanes)	Semestral
7	Bomba LGLD4	GO-C-0002-BOM	B4	Verificar conexiones y sellos	Mensual
7	Bomba LGLD4	GO-C-0002-BOM	B5	Inspección general de la bomba	Semestral
7	Bomba LGLD4	GO-C-0002-BOM	B6	Verificar alineación con el motor	Semestral
8	Motor No Identificado	GO-C-0004-MOT	M1	Inspección visual y auditiva	2 veces por semana

8	Motor No Identificado	GO-C-0004-MOT	M2	Verificación de conexiones eléctricas	Mensual
8	Motor No Identificado	GO-C-0004-MOT	M3	Limpieza de ventilación exterior	2 veces por semana
8	Motor No Identificado	GO-C-0004-MOT	M4	Lubricación de rodamientos	Semestral
8	Motor No Identificado	GO-C-0004-MOT	M5	Prueba de resistencia de aislamiento	Anual
8	Motor No Identificado	GO-C-0004-MOT	M6	Verificación de vibraciones y ruidos	2 veces por semana
9	Bomba LGLD3E	GO-C-0003-BOM	B1	Limpieza y revisión de filtros	Semanal
9	Bomba LGLD3E	GO-C-0003-BOM	B2	Lubricar rodamientos	Mensual
9	Bomba LGLD3E	GO-C-0003-BOM	B3	Inspección de paletas (vanes)	Semestral
9	Bomba LGLD3E	GO-C-0003-BOM	B4	Verificar conexiones y sellos	Mensual
9	Bomba LGLD3E	GO-C-0003-BOM	B5	Inspección general de la bomba	Semestral
9	Bomba LGLD3E	GO-C-0003-BOM	B6	Verificar alineación con el motor	Semestral
10	Motor BZ610444	GO-C-0005-MOT	M1	Inspección visual y auditiva	2 veces por semana
10	Motor BZ610444	GO-C-0005-MOT	M2	Verificación de conexiones eléctricas	Mensual
10	Motor BZ610444	GO-C-0005-MOT	M3	Limpieza de ventilación exterior	2 veces por semana
10	Motor BZ610444	GO-C-0005-MOT	M4	Lubricación de rodamientos	Semestral
10	Motor BZ610444	GO-C-0005-MOT	M5	Prueba de resistencia de aislamiento	Anual
10	Motor BZ610444	GO-C-0005-MOT	M6	Verificación de vibraciones y ruidos	2 veces por semana
11	Bomba LGLD3F	GO-C-0004-BOM	B1	Limpieza y revisión de filtros	Semanal
11	Bomba LGLD3F	GO-C-0004-BOM	B2	Lubricar rodamientos	Mensual
11	Bomba LGLD3F	GO-C-0004-BOM	B3	Inspección de paletas (vanes)	Semestral
11	Bomba LGLD3F	GO-C-0004-BOM	B4	Verificar conexiones y sellos	Mensual
11	Bomba LGLD3F	GO-C-0004-BOM	B5	Inspección general de la bomba	Semestral
11	Bomba LGLD3F	GO-C-0004-BOM	B6	Verificar alineación con el motor	Semestral
12	Motor CB469659	GO-C-0006-MOT	M1	Inspección visual y auditiva	2 veces por semana
12	Motor CB469659	GO-C-0006-MOT	M2	Verificación de conexiones eléctricas	Mensual
12	Motor CB469659	GO-C-0006-MOT	M3	Limpieza de ventilación exterior	2 veces por semana
12	Motor CB469659	GO-C-0006-MOT	M4	Lubricación de rodamientos	Semestral
12	Motor CB469659	GO-C-0006-MOT	M5	Prueba de resistencia de aislamiento	Anual
12	Motor CB469659	GO-C-0006-MOT	M6	Verificación de vibraciones y ruidos	2 veces por semana

Nota: Elaboración propia.

Este plan brinda respuesta directa a la falta de planificación sistemática encontrada en el diagnóstico. Al tener definidas las actividades, sus responsables y los tiempos estimados, se elimina la improvisación que actualmente caracteriza al mantenimiento. Además, la incorporación de inspecciones visuales y auditivas periódicas permite anticipar fallas, aumentando el MTBF y reduciendo los tiempos de reparación. De ese modo, el plan no solo organiza las labores, sino que

también se convierte en un instrumento de control que facilita la medición de indicadores de confiabilidad y disponibilidad.

5.1.4 Manual de mantenimiento

El manual de mantenimiento constituye el tercer pilar de la propuesta y recopila los procedimientos estandarizados para cada actividad. En la tabla 16, se detallan aspectos tales como el “qué se hace”, “cómo se hace”, las herramientas requeridas, los parámetros de control y las acciones correctivas en caso de desviaciones. De esta forma, el manual permite garantizar que las intervenciones se realicen bajo criterios uniformes y verificables, independientemente del técnico que las ejecute.

Tabla 16. Manual de Mantenimiento

Código Actividad	Actividad	Tipo de Mantenimiento	Qué	Por qué	Quién realiza	Cuando	Dónde	Cómo se hace	Duración (min)
C1	Medir presión de aceite cárter	En funcionamiento	Verificar presión óptima del aceite	Evitar daño por falta de lubricación	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Diario	Cárter del compresor	Detener el equipo y esperar 5 minutos para estabilización. Conectar manómetro calibrado en el puerto del cárter. Herramienta: manómetro 0–100 psi. Parámetro esperado: 20–60 psi. Si está fuera de rango: verificar nivel de aceite, revisar bomba de aceite o línea obstruida.	10
C2	Medir presión de descarga	En funcionamiento	Verificar presión de descarga	Detectar fallas o sobrepresiones	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Diario	Descarga del compresor	Con el equipo en funcionamiento, conectar manómetro en línea de descarga posterior a la válvula de retención. Herramienta: manómetro 0–200 psi. Parámetro esperado: 80–150 psi. Si es bajo: revisar fugas o desgaste en el compresor. Si es alto: verificar obstrucciones en la línea.	10
C3	Revisión visual general	En funcionamiento	Revisar fugas, ruidos o daños externos	Identificar fallos tempranos	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	2 veces por semana	Toda la unidad	Inspeccionar todo el equipo con linterna LED y estetoscopio mecánico. Buscar fracturas, fugas, conexiones sueltas y ruido anómalo. Herramientas: linterna, estetoscopio mecánico, guantes. Parámetro esperado: sin deformaciones, sin fugas, sin ruidos extraños. Acción: si hay anomalías, detener el equipo e iniciar revisión técnica.	15
C4	Verificar nivel aceite del cárter	En funcionamiento	Medir y reponer si necesario	Mantener lubricación adecuada	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Mensual	Cárter	Con el equipo detenido, extraer y limpiar varilla, reinsertar y verificar. Herramienta: varilla medidora, embudo. Parámetro esperado: nivel dentro de marcas MIN y MAX. Acción si es bajo: rellenar con Sta-Lube SAE 30. Si es alto: drenar el exceso para evitar sobrepresión.	30
C5	Drenar líquidos acumulados	En funcionamiento	Eliminar agua o aceite acumulado	Evitar contaminación o daño por condensados	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	2 veces por semana	Drenajes inferiores	Abrir válvulas de purga por gravedad con el sistema despresurizado. Usar recipiente recolector. Herramientas: llave, guantes, recipiente. Se espera: salida de líquido sin residuos sólidos. Si hay sólidos: programar limpieza interna.	30
C6	Drenar distanciadores	En funcionamiento	Drenar cámara intermedia	Prevenir acumulación de líquidos	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	2 veces por semana	Cámara intermedia	Abrir válvula inferior según el manual Corken. Herramientas: llave, guantes, contenedor. Precaución: equipo sin presión. Si hay residuos contaminantes: realizar limpieza del sistema.	30

C7	Limpiar áreas de enfriamiento	Paro programado	Eliminar suciedad de aletas e intercambiadores	Evitar sobrecalentamientos	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Mensual si se presentan los siguientes síntomas: Sobrecalentamiento del compresor, acumulación visible de polvo o grasa, disminución de flujo de aire en aletas.	Intercambiadores	Desconectar el equipo. Usar aire comprimido (<90 psi) y brochas suaves para eliminar polvo y grasa. Herramientas: compresor, brochas, protección ocular. Frecuencia: mensual o según acumulación. Si hay obstrucción severa: desmontar componentes para limpieza profunda.	60
C8	Revisar tanque de lubricante	Paro programado	Verificar nivel y presión del tanque	Garantizar presión y volumen adecuados de lubricación	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Mensual si se presentan los siguientes síntomas: Nivel bajo o vacío en visor, presión de lubricación inestable, fugas visibles en líneas o tanque.	Tanque externo	Inspeccionar el visor. Si el nivel está bajo, rellenar con Sta-Lube SAE 30. Herramientas: linterna, embudo. Parámetro esperado: visor debe mostrar nivel dentro del rango. Acción si está vacío: detener operación inmediatamente y revisar por fugas.	30
C9	Verificar tensión de correas	Paro programado	Ajustar tensión correcta	Prevenir deslizamientos o roturas	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Mensual si se presentan los siguientes síntomas: Deslizamientos de poleas, ruidos de patinaje, desgaste irregular en correas, pérdida de velocidad.	Motor y poleas	Usar tensiómetro digital o manual. Herramientas: tensiómetro, llave de ajuste. Parámetro esperado: 60–90 libras. Si está floja: reajustar. Si está muy tensa: aflojar para evitar daño al eje.	30
C10	Inspección ensamble de válvulas	Paro programado	Verificar estado de válvulas	Garantizar correcto funcionamiento	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Semestral si se presentan los siguientes síntomas: Pérdida de compresión, caída de presión de descarga, ruidos metálicos en cabezal, fugas en válvulas.	Cabezal	Desarmar parcialmente, limpiar y revisar asientos, empaques y resortes. En caso de desgaste o daño mayor, reemplazar con kit de reparación 35552-X4-MCA (Compresor 691) o 3551-X1 (Compresor 491)	60
C11	Lubricar rodamientos del motor	Paro programado	Engrase preventivo	Disminuir desgaste de partes móviles	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Semestral si se presentan los siguientes síntomas: Ruidos anormales en rodamientos, vibración excesiva en motor, aumento de temperatura en carcasa.	Motor del compresor	Aplicar grasa EP2 hasta leve rebose con pistola. Herramientas: pistola engrasadora, grasa NLGI 2 base litio. Parámetro esperado: rebose leve. Si rebosa en exceso: retirar exceso para evitar sobrepresión.	60
C12	Verificar puntos eléctricos del motor	Paro programado	Revisar terminales y conexiones	Prevenir cortocircuitos o fallas eléctricas	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Anual si se presentan los siguientes síntomas: Olor a quemado, falsos contactos, disparos frecuentes de protecciones, calentamiento en la caja de conexiones.	Caja de conexiones	Aislar el motor, limpiar terminales, apretar tornillos, verificar continuidad. Herramientas: multímetro, destornillador, guantes dieléctricos. Parámetro: resistencia <0.3 ohm. Si no hay continuidad: reemplazar cable o borne.	60
C13	Inspección anillos del pistón	Paro programado	Verificar desgaste	Mantener compresión y eficiencia del gas	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Semestral si se presentan los siguientes síntomas: Pérdida de compresión, consumo excesivo de aceite, humo o fugas visibles de gas en cilindros.	Cilindros	Desarme parcial, inspección con galgas, reemplazo si hay desgaste. Para intervención mayor, utilizar kit de reparación 35552-X4-MCA (Compresor 691) o 3551-X1 (Compresor 491) .	60
M1	Inspección visual y auditiva	Equipo en funcionamiento	Detectar ruidos, vibraciones o sobrecalentamiento	Para identificar señales tempranas de falla en rodamientos, ventilador o devanados	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Mensual si se presentan los siguientes síntomas: Olor a quemado, falsos contactos, calentamiento anormal en terminales, caída de voltaje.	Carcasa, ventilación	Con equipo en marcha, usar estetoscopio y linterna. Observar vibraciones, ruidos, fugas. Herramientas: estetoscopio mecánico, linterna. Acción si hay ruido anómalo: parar equipo y diagnosticar.	30

M2	Verificación de conexiones	Paro programado	Revisar estado de cables, bornes y terminales	Para prevenir cortocircuitos, calentamiento excesivo y pérdida de energía	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	2 veces por semana	Caja de terminales	Revisión de terminales eléctricos. Limpiar, apretar, medir continuidad. Herramientas: destornillador, multímetro. Parámetro: resistencia <0.3 ohm. Si hay falsos contactos: reapretar o cambiar terminal.	30
M3	Limpieza de ventilación exterior	Equipo en funcionamiento	Retirar polvo y residuos de rejillas de ventilación	Para evitar sobrecalentamiento del motor que reduce eficiencia y vida útil	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Semestral si se presentan los siguientes síntomas: Vibraciones anómalas, ruido irregular en rodamientos, temperatura elevada en extremos del eje.	Aletas, ranuras de motor	Remover suciedad de rendijas, tapas y ventiladores. Herramientas: aire comprimido, cepillo, trapo seco. Acción si está obstruido: desmontar ventilación para limpieza profunda.	60
M4	Lubricar rodamientos	Paro programado	Aplicar grasa a cojinetes del motor	Para reducir la fricción, prevenir daños por desgaste o bloqueo del eje	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Anual si se presentan los siguientes síntomas: Disparo de protecciones, fugas de corriente, humedad visible en motor, olor a quemado en devanados.	Graseras externas	Engrasar puntos indicados hasta reboso leve. Herramientas: pistola engrasadora, grasa NLGI 2. Evitar: exceso de grasa que dañe sellos.	60
M5	Prueba de aislamiento	Paro programado	Medir resistencia del aislamiento de devanados	Para asegurar que no haya fuga de corriente o deterioro del esmalte aislante de los bobinados	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	2 veces por semana si se presentan los siguientes síntomas: Vibraciones fuera de lo normal, desalineación perceptible, ruido irregular o aflojamiento en bases.	Terminales de conexión	Aplicar megado entre bobinados y tierra (500–1000 VDC). Herramientas: megóhmetro. Parámetro mínimo: >100 MΩ. Si es menor: secar motor, revisar contaminación interna.	60
M6	Verificación de vibraciones	Paro programado	Detectar vibraciones o desalineación del motor	Para identificar desequilibrios, desalineación o fallas tempranas en cojinetes	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Semanal si se presentan los siguientes síntomas: Pérdida de caudal, cavitación (ruido tipo golpeteo), presión de succión inestable, suciedad visible en visor.	Base, carcasa y eje	Medición con sensor de vibración o inspección táctil. Herramientas: medidor de vibración, estetoscopio. Parámetro esperado: vibración estable y continua. Si hay vibración anómala: alinear, revisar rodamientos o bases.	30
B1	Limpieza de filtros (strainers)	Paro programado	Eliminar sedimentos u obstrucciones	Para evitar cavitación, pérdida de presión y daños por partículas sólidas	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Semestral si se presentan los siguientes síntomas: Pérdida de caudal, cavitación, vibración irregular, presión de descarga inestable.	Entrada de succión	Desmontar tapa, limpiar con solvente o aire. Revisar estado. Herramientas: llave, solvente dieléctrico, aire comprimido. Acción si está dañado: reemplazar filtro.	30
B2	Lubricación de rodamientos	Paro programado	Engrasar cojinetes de bomba	Para minimizar fricción, evitar sobrecalentamiento y prolongar vida útil	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Mensual si se presentan los siguientes síntomas: Fugas visibles en bridas o empaques, olor a gas, tornillos flojos, manchas de aceite.	Graseras exteriores	Aplicar grasa NLGI 2 base litio con pistola hasta reboso moderado. Herramientas: pistola, grasa. Evitar: sobre engrasado.	60
B3	Inspección de paletas (vanes)	Paro programado	Verificar desgaste, holgura y forma de paletas internas	Para asegurar funcionamiento hidráulico eficiente y evitar pérdidas de caudal	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Semestral si se presentan los siguientes síntomas: Ruidos anómalos, vibración irregular, sobrecalentamiento en carcasa, fugas externas.	Cámara de bombeo	Desarme parcial, medición con galgas, reemplazo si hay desgaste. En caso de requerir sustitución mayor, usar kit de reparación 898981 (3") o kit 8922 (4") , así como repuestos específicos: camisa 18511 (3") / 182000 (4") , rotor 265148 (3") / 262041 (4") .	60

B4	Verificación de conexiones	Paro programado	Revisar estado de bridas, empaques y sellos	Para evitar fugas de gas o líquidos que puedan ser peligrosas	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Semestral si se presentan los siguientes síntomas: Vibraciones excesivas, desgaste prematuro de acople, fugas en sello mecánico, aumento de consumo energético.	Bridas, empaques	Revisar estado de tornillos, empaques y conexiones mecánicas. Herramientas: torquímetro, llave, inspección visual. Si hay fuga o aflojamiento: reapretar y sellar.	60
B5	Inspección general de bomba	Paro programado	Evaluación integral de operación y condición externa	Para verificar funcionamiento general y detectar posibles deterioros	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Semestral si se presentan los siguientes síntomas: Ruidos anómalos, vibración irregular, sobrecalentamiento en carcasa, fugas externas.	Toda la estructura de la bomba	Inspección visual, ruidos, fugas, temperatura y vibraciones. Ante desgaste de componentes internos, reemplazar con repuestos críticos: kit 898981 (3") / 8922 (4"), camisas 18511-182000, y rotores 265148-262041.	30
B6	Verificar alineación con motor	Paro programado	Medir y corregir desalineación entre ejes	Para evitar fatiga en ejes, fugas por sellos rotativos y consumo excesivo de energía	Coordinador y Ayudante de Mantenimiento GLP	Semestral si se presentan los siguientes síntomas: Vibraciones excesivas, desgaste prematuro de acople, fugas en sello mecánico, aumento de consumo energético.	Acoplamiento bomba-motor	Medir con reloj comparador, galgas o alineador láser. Parámetro máximo: desalineación <0.15 mm. Acción si excede: realinear completamente.	60

Nota: Elaboración propia con base en los manuales de fabricante.

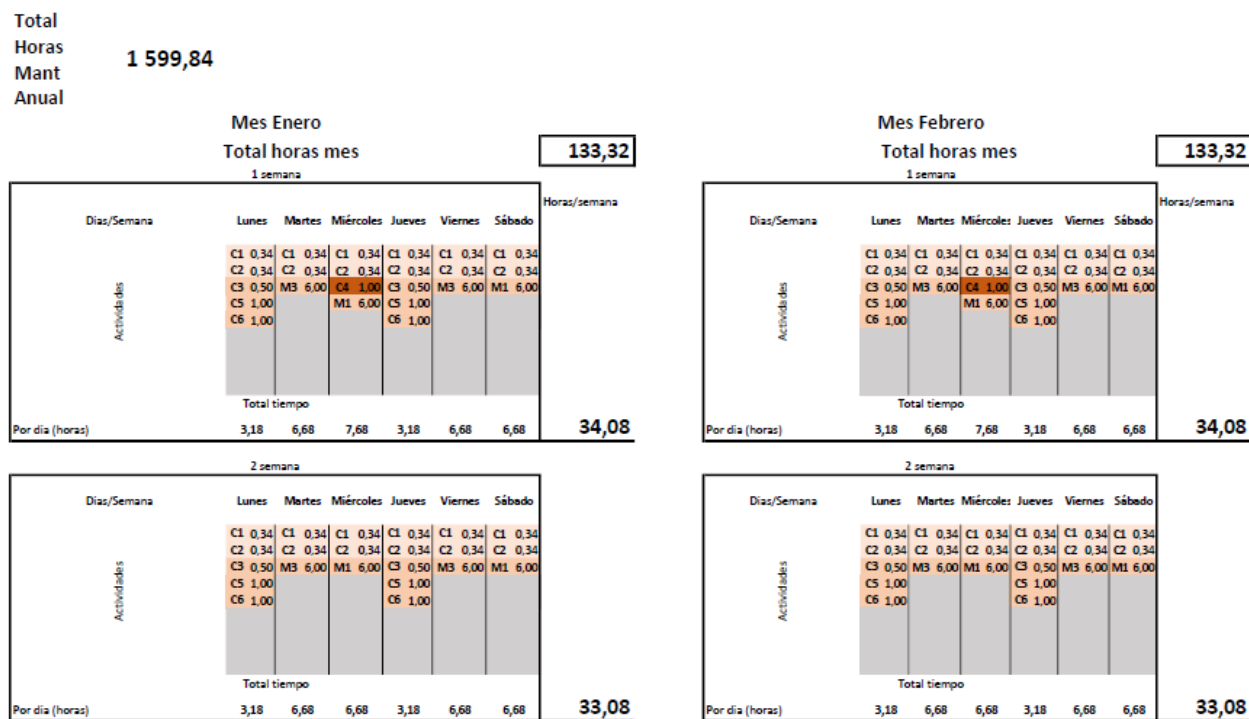
Este documento complementa y moderniza los procedimientos identificados en el Capítulo IV de este trabajo, donde se observó que los métodos existentes para la instalación y mantenimiento de los equipos críticos requieren actualización y sistematización. El manual incorpora protocolos estandarizados de intervención, así como medidas de seguridad específicas para el manejo de GLP, garantizando que el personal ejecute las tareas de acuerdo con las normativas técnicas vigentes y minimizando riesgos operativos.

5.1.5 Cronograma de mantenimiento

El cronograma de mantenimiento elaborado para Z Gas Costa Rica es la herramienta operativa que traduce el plan de actividades en una programación semanal y mensual. Este documento permite organizar de forma equilibrada la ejecución de las tareas de mantenimiento, considerando tanto las actividades que pueden realizarse con los equipos en funcionamiento como aquellas que requieren un paro programado de la operación.

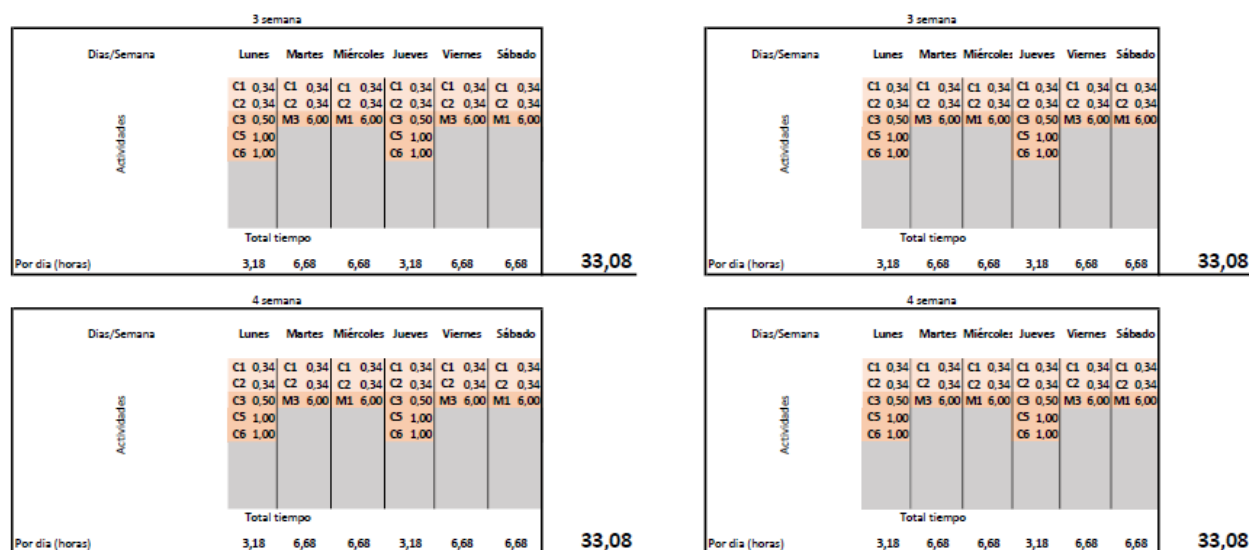
Las figura 22 y 23 ofrecen un detalle del cronograma de mantenimiento preventivo con los equipos en funcionamiento.

Figura 22. Cronograma Mantenimiento con equipos en funcionamiento



Nota: Elaboración propia.

Figura 23. Cronograma Mantenimiento con equipos en funcionamiento

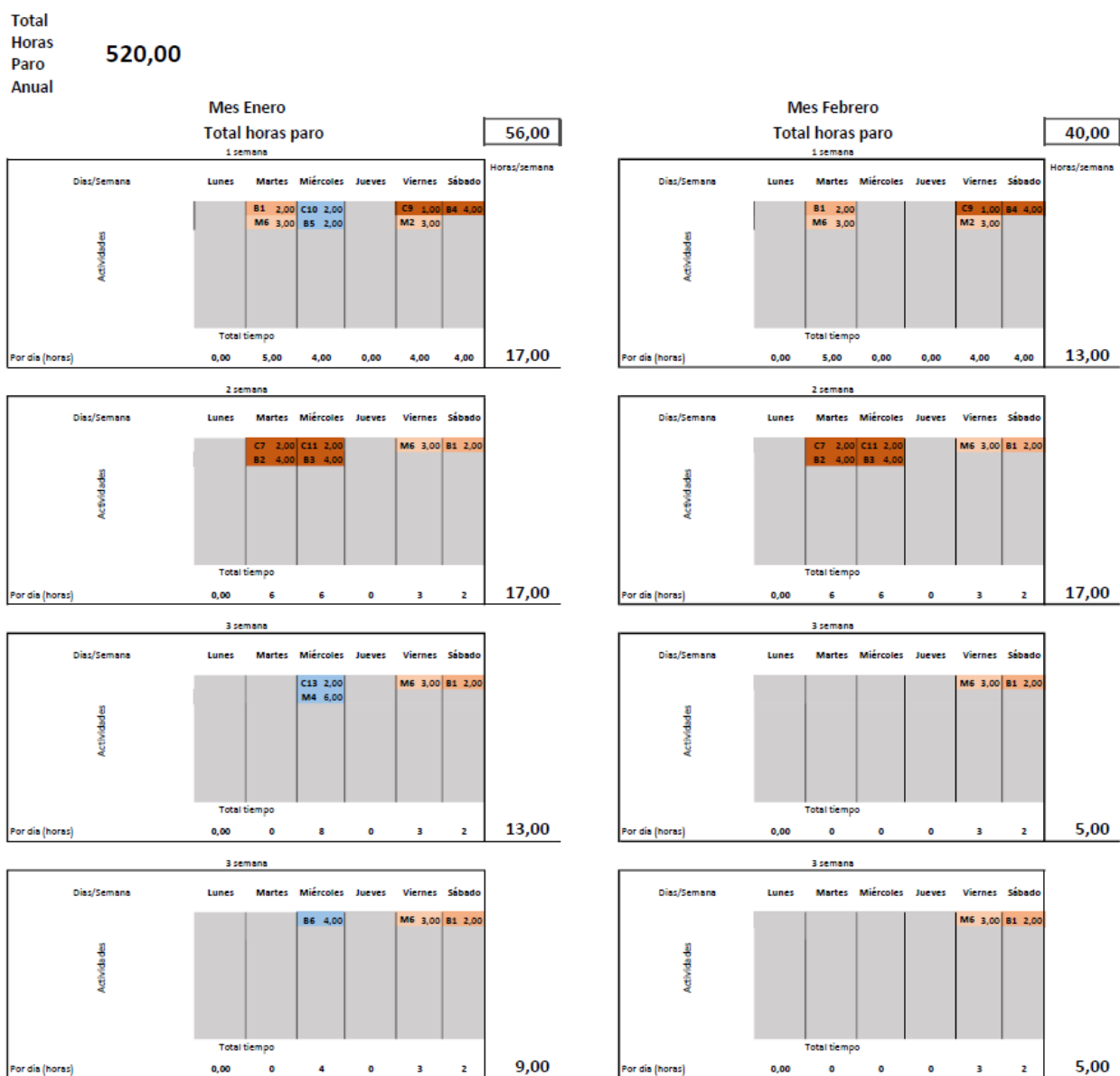


Nota: Elaboración propia.

En el caso de los cronogramas de equipos en funcionamiento, se distribuyeron las actividades rutinarias con frecuencias diarias, semanales y mensuales, ajustándolas a la disponibilidad real del recurso humano. El total anual de horas planificadas asciende a 1600, lo que se traduce en una carga promedio de 134 horas mensuales. Dicho cálculo permite prever el tiempo requerido y establecer un balance entre la operación y el mantenimiento, evitando sobrecargar al personal técnico. Las actividades fueron unificadas según su frecuencia, con el fin de ejecutarse en bloque durante la semana o, en casos puntuales, cada dos semanas. Este enfoque permite optimizar la mano de obra y reducir la dispersión de tareas, además de establecer un orden que facilite la trazabilidad mediante las fichas históricas de mantenimiento.

En la Figura 24 se observa el cronograma de paros programados.

Figura 24. Cronograma de paros programados



Nota: Elaboración propia.

Por su parte, el cronograma de paros programados concentra aquellas intervenciones que requieren detener los equipos, como la sustitución de sellos, el reemplazo de rodamientos o el ajuste de alineaciones. Estas labores suman un total de 520 horas anuales, distribuidas de manera que el impacto sobre la operación se reduzca al mínimo. La programación considera bloques de tiempo específicos, alineados a la capacidad del personal disponible, de modo que cada intervención pueda ejecutarse de manera integral durante la jornada asignada. Al igual que en las actividades con

equipos en funcionamiento, la duración estimada de cada tarea es aproximada y está sujeta a ajustes conforme se adquiriera mayor experiencia en la planta.



Ambos cronogramas incluyen notas metodológicas que refuerzan su aplicabilidad práctica. Entre ellas se establece la posibilidad de subcontratar o recurrir a horas extras en caso de sobrecarga de actividades, así como la obligatoriedad de registrar las horas efectivamente invertidas en las fichas históricas. Asimismo, se indica que el esquema utilizado para el mes de enero funciona como referencia para balancear cargas de trabajo, ejercicio que debe replicarse en todos los meses del año.

5.1.6 Manual de proceso de mantenimiento preventivo

Este manual tiene como finalidad estandarizar el procedimiento de mantenimiento preventivo aplicado a la bomba Blackmer código GO-C-0004-BOM, ubicada en los sistemas de trasiego de gas LP de la planta El Coyol de Z Gas Costa Rica. El documento establece las responsabilidades, recursos, medidas de seguridad y actividades específicas necesarias para garantizar la correcta inspección de las paletas (vanes), contribuyendo así a prolongar la vida útil del equipo y reducir el riesgo de fallas inesperadas.

En las siguientes figura 25, 26, 27, 28 y 29 se muestra una propuesta del manual de procesos correspondiente a la actividad B3 del plan de mantenimiento, la cual detalla los pasos técnicos, las herramientas requeridas y los criterios de verificación asociados con la inspección de las paletas.

Figura 25. Manual de procesos

	Protocolo de Inspección de paletas (vanes)				
	Planta:	Coyol	Versión:		1.0
	Equipo:	Bomba LGLD3F	Elaborado por:		Steven Retana
	Código:	GO-C-0004-BOM	Emisión:		Julio 2025

1. APROBACIÓN ORDEN DE TRABAJO

Solicitó	Steven Retana	Pasante Operaciones
Revisó	Douglas Lobo	Jefe Mantenimiento Plantas
Aprobó	Guido Gutierrez	Gerente Operaciones
Asignado a:	Ronny Durán	Mantenimiento

2. CONTROL DE TIEMPOS

Fecha de Ejecución	Tiempo Estimado Mant. Preventivo	Tiempo Estimado Mant. Correctivo
Agosto 2025	1,00 horas	0,5 horas

A continuación, información detalla el procedimiento para aplicar la tarea de mantenimiento.

3. OBJETIVO

Establecer el procedimiento estandarizado para realizar la Inspección de paletas (vanes), con el fin de garantizar su funcionamiento eficiente, prevenir fallas y prolongar su vida útil.

4. ALCANCE

Aplicar el Protocolo de Inspección de paletas (vanes) de la bomba GO-C-0004-BOM utilizada en los sistemas de trasiego de gas LP en la Planta de El Coyol Z Gas Costa Rica.

5. RESPONSABLE

Técnico de Mantenimiento

6. FRECUENCIA DE LA REVISIÓN

Inspección preventiva: Cada 6 meses

Cambio correctivo: En caso de desgaste, daño o falla detectada

7. PROTOCOLO DE SEGURIDAD



- **LOTO (Lockout/Tagout):** Procedimiento de bloqueo y etiquetado para garantizar la desconexión segura de fuentes de energía antes de realizar trabajos de mantenimiento.

8. DEFINICIONES

- **Vanes o paletas:** Elementos deslizantes dentro del rotor de la bomba que generan el desplazamiento del gas.
- **Calibrador Vernier:** Herramienta de medición de alta precisión usada para comprobar el grosor de las paletas.
- **Torque:** Fuerza aplicada al ajustar pernos, medida en N·m o lb·ft.

Nota: Elaboración propia.

Figura 26. Manual de procesos

	Protocolo de Inspección de paletas (vanes)				
	Planta:	Coyol	Versión:		1.0
	Equipo:	Bomba LGLD3F	Elaborado por:		Steven Retana
	Código:	GO-C-0004-BOM	Emisión:		Julio 2025

- **Deslizamiento libre:** Capacidad de las paletas de moverse sin fricción excesiva dentro de las ranuras del rotor.

9. EQUIPOS Y HERRAMIENTAS NECESARIAS



- Trapos limpios
- Desengrasante
- Llave dinamométrica
- Calibrador Vernier
- Extractor de paletas
- Aceite recomendado por Blackmer
- Manual técnico del fabricante
- [Ficha técnica del equipo](#)

10. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

- A. **Aplicación LOTO:** Desconexión total y bloqueo del equipo y establecer un área perimetral para prevenir accidentes durante el mantenimiento.
- B. **Drenaje de la bomba:** Utilice las válvulas de purga designadas para liberar la presión interna y los residuos de gas o líquido del sistema.
- C. **Limpieza externa del equipo:** Utilizando trapos limpios y desengrasante si es necesario, remueva polvo, grasa o suciedad del área de trabajo.
- D. **Retiro de tapa frontal:** Afloje y extraiga los pernos que sujetan la tapa de la bomba para acceder al rotor y a las paletas internas.
- E. **Girar rotor manualmente:** Rote el eje de forma manual para verificar que las paletas se deslicen con libertad en sus ranuras.
- F. **Extracción de paletas:** Retirar las paletas cuidadosamente, una a una. Si presentan resistencia, utilizar extractor de paletas sin dañar el rotor.
- G. **Limpieza e inspección paletas:** Elimine residuos con un paño seco y revise visualmente el estado físico: desgaste, fracturas, quemaduras o esquinas redondeadas.
- H. **Medición grosor con calibrador Vernier:** Verifique el grosor de cada paleta y comparando con las especificaciones del fabricante para determinar si están dentro de tolerancia.
 - Si las paletas están dentro de tolerancia, proceder al paso II.
 - Si las paletas están fuera de tolerancia, saltar al paso J.
- I. **Lubricar paletas y ranuras:** Aplique aceite recomendado en cada paleta y en las ranuras del rotor para asegurar su libre desplazamiento.

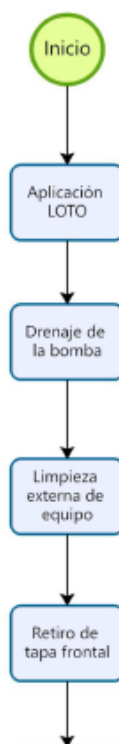
Nota: Elaboración propia.

Figura 27. Manual de procesos

	Protocolo de Inspección de paletas (vanes)				
	Planta:	Coyol	Versión:		1.0
	Equipo:	Bomba LGLD3F	Elaborado por:		Steven Retana
	Código:	GO-C-0004-BOM	Emisión:		Julio 2025

- J. Reinstalar o reemplazar paletas: Coloque nuevamente las paletas en buen estado o reemplácelas si están defectuosas, asegurando su correcta orientación.
- K. Cerrar bomba y aplicar torque: Coloque la tapa frontal y ajuste los pernos con el torque especificado para garantizar el sellado correcto y seguro.
- L. Verificación de movimiento libre: Gire nuevamente el rotor manualmente para confirmar que no haya roces, bloqueos o fricción anormal.
- M. Retirar LOTO y energizar sistema: Retire el bloqueo y encienda el equipo para verificar su funcionamiento normal bajo condiciones operativas, finalizado el mantenimiento levante el área perimetral.
- N. Registrar actividad: Anote en la bitácora los trabajos realizados, los repuestos utilizados, y complete el formulario de inspección correspondiente.

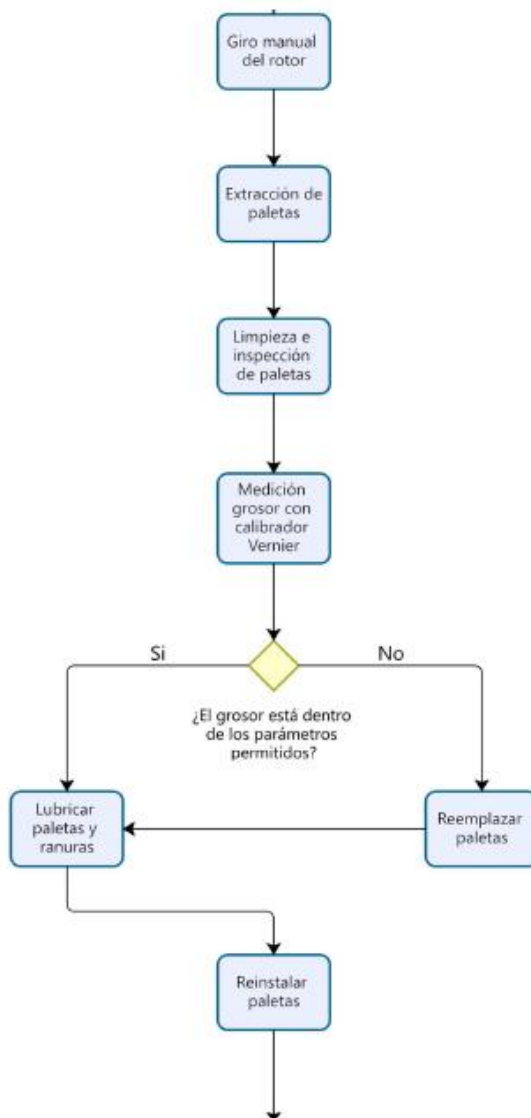
11. DIAGRAMA DE FLUJO DE LAS ACTIVIDADES



Nota: Elaboración propia.



Figura 28. Manual de procesos

	Protocolo de Inspección de paletas (vanes)				
	Planta:	Coyol	Versión:		1.0
	Equipo:	Bomba LGLD3F	Elaborado por:		Steven Retana
	Código:	GO-C-0004-BOM	Emisión:		Julio 2025



Nota: Elaboración propia.

Figura 29. Manual de procesos

	Protocolo de Inspección de paletas (vanes)				
	Planta:	Coyol	Versión:		1.0
	Equipo:	Bomba LGLD3F	Elaborado por:		Steven Retana
	Código:	GO-C-0004-BOM	Emisión:		Julio 2025



Nota: Elaboración propia.

En cuanto a la aprobación de la orden de trabajo, el procedimiento fue solicitado por el pasante de operaciones, revisado por el jefe de mantenimiento de plantas, y aprobado por el gerente de operaciones, asignándose la ejecución al técnico del área de mantenimiento. El control de tiempos establece que la ejecución del procedimiento se programó para el mes de agosto de 2025, con una duración estimada de 1,5 horas.

El objetivo principal consiste en definir un procedimiento estandarizado para la inspección de las paletas de la bomba, de forma que se asegure un funcionamiento eficiente del equipo, se prevengan fallas prematuras y se prolongue su vida útil. El alcance de este procedimiento se circunscribe a la bomba GO-C-0004-BOM empleada en la operación de trasiego de GLP, siendo de aplicación obligatoria para todo el personal técnico de la planta.

El responsable directo de la ejecución es el técnico de mantenimiento asignado, quien deberá cumplir con las frecuencias establecidas: una inspección preventiva cada seis meses y un cambio correctivo en caso de desgaste, daño o falla detectada en las paletas.

En materia de seguridad, el procedimiento contempla la aplicación del protocolo LOTO (Lockout/Tagout), con el fin de garantizar la desconexión segura de todas las fuentes de energía antes de iniciar el trabajo, además de la delimitación perimetral del área de intervención para prevenir accidentes.

Para asegurar un entendimiento homogéneo, se establecen definiciones clave: las paletas o vanes corresponden a los elementos deslizantes del rotor que generan el desplazamiento del gas; el calibrador Vernier es la herramienta utilizada para comprobar el grosor de las paletas con alta precisión; el torque se refiere a la fuerza aplicada al ajuste de pernos, medida en N·m o lb·ft; y el deslizamiento libre se define como la capacidad de las paletas de moverse sin fricción excesiva dentro de sus ranuras.

Las herramientas y equipos necesarios incluyen trapos limpios, desengrasante, llave dinamométrica, calibrador Vernier, extractor de paletas, aceite recomendado por el fabricante Blackmer, el manual técnico del fabricante y la ficha técnica del equipo. La disponibilidad de estos recursos es indispensable para la correcta ejecución del procedimiento.

La descripción de actividades se desarrolla en una secuencia lógica que inicia con la aplicación del procedimiento LOTO, seguida del drenaje de la bomba mediante válvulas de purga para liberar presión interna y residuos de gas o líquido. Posteriormente, se efectúa la limpieza externa con trapos y desengrasante, y se procede a retirar la tapa frontal de la bomba para acceder al rotor. A continuación, se verifica el movimiento manual del rotor, asegurando que las paletas se deslicen libremente. En caso de resistencia, las paletas deben retirarse cuidadosamente utilizando un extractor adecuado.

Una vez extraídas, se realiza la limpieza e inspección de cada paleta, evaluando signos de desgaste, fracturas o deformaciones. Con el calibrador Vernier se mide el grosor y se comparan los valores con las especificaciones del fabricante. Si las paletas cumplen con la tolerancia, se lubrican con aceite recomendado y se reinstalan en las ranuras correspondientes; de lo contrario, se procede a su reemplazo inmediato. Acto seguido, se reinstala la tapa frontal y se ajustan los pernos aplicando

el torque especificado. Como paso de verificación, se gira nuevamente el rotor manualmente para confirmar el libre desplazamiento.

Para finalizar se retira el procedimiento de bloqueo y se energiza el sistema para comprobar el funcionamiento normal de la bomba bajo condiciones operativas. Una vez validada la operación, se levanta el perímetro de seguridad y se registran en la bitácora las tareas realizadas, los repuestos utilizados y el formulario de inspección correspondiente.

El procedimiento se sintetiza en un diagrama de flujo que representa gráficamente la secuencia de actividades, facilitando su comprensión y aplicación práctica por parte del personal de mantenimiento. Este manual, en consecuencia, constituye un documento oficial que estandariza las prácticas de inspección, fortalece la seguridad del personal, asegura la confiabilidad del equipo y aporta trazabilidad a las actividades realizadas.

5.2 Control de la implementación

La puesta en marcha de un Plan de Mantenimiento Preventivo exige la definición de un mecanismo de control que permita verificar su efectividad y garantizar la confiabilidad de los equipos críticos. Para este propósito, la presente propuesta contempla la utilización de tres indicadores de gestión ampliamente reconocidos: el tiempo medio para reparar (MTTR), el tiempo medio entre fallas (MTBF) y la disponibilidad operacional. Estos indicadores constituyen una herramienta fundamental para evaluar la mantenibilidad, confiabilidad y disponibilidad de los equipos, siendo aplicados de manera sistemática en procesos industriales con el fin de asegurar la continuidad operativa.

Para lograr lo mencionado, se plantea una metodología que permita, en primer lugar, verificar el cumplimiento de las actividades de mantenimiento programadas; en segundo lugar, evaluar la confiabilidad de compresores, bombas y motores a partir del análisis de fallas y tiempos de operación y, finalmente, determinar el nivel de disponibilidad alcanzado, de manera que se garantice la continuidad de los procesos de distribución.

5.2.1 Cronograma Propuesto

La implementación del plan se estructuró considerando los tiempos reales asociados a la gestión logística, la capacitación técnica del personal y los procesos administrativos de aprobación. En particular, la importación de repuestos críticos como válvulas, sellos y empaques puede requerir

hasta tres meses, dependiendo de la disponibilidad en fábrica y las condiciones del proveedor internacional. Por lo tanto, el cronograma de ejecución contempla un margen prudente para cubrir dichos periodos, sin afectar la secuencia de actividades programadas. Al mismo tiempo, se toma en cuenta la curva de aprendizaje del personal técnico, permitiendo un ajuste progresivo en la ejecución hasta alcanzar la eficiencia operativa prevista.

La siguiente figura 30 muestra el cronograma de implementación de la propuesta iniciando en enero 2026.

Figura 30. Cronograma de Implementación

ACTIVIDAD	FASE	DURACIÓN ESPERADA (SEMANAS)	ENERO 2026	FEBRERO 2026	MARZO 2026	ABRIL 2026	MAYO 2026	JUNIO 2026
Aprobación del presupuesto y planificación inicial	1	2	■	■				
Solicitud e importación de repuestos críticos	2	12	■	■	■	■	■	■
Traslado de repuestos y consumibles de bodega a plantas	3	2				■	■	
Capacitación técnica del personal	4	1					■	
Documentación inicial del plan de mantenimiento	5	4					■	■
Evaluación inicial de desempeño	6	2						■
Ajustes finales y estandarización	7	1						■

Nota: Elaboración propia.

5.2.2 Indicadores de calidad

En el contexto operativo de la empresa Z Gas Costa Rica, se considera aceptable una disponibilidad igual o superior al 95 %, ya que este margen del 5 % de inactividad corresponde principalmente a mantenimientos programados o ajustes preventivos planificados, los cuales no afectan la continuidad del servicio debido a la existencia de equipos redundantes y a la planificación de paros en horarios no productivos. Por esa razón, la meta establecida garantiza la confiabilidad de los sistemas sin comprometer la capacidad operativa de la planta.

La estrategia de implementación del control contempla la recolección sistemática de datos mediante bitácoras digitales de mantenimiento, en las que se registrarán horas de operación, tiempos de paro, causas de falla, tiempos de reparación y repuestos utilizados. Con base en esta información, los indicadores se calcularán mensualmente y se consolidarán en un informe trimestral que permita la identificación de tendencias y la comparación de resultados frente a metas preestablecidas. La responsabilidad de registrar la información recaerá en los técnicos de mantenimiento, mientras que el análisis de los indicadores y la elaboración de los informes será competencia del jefe de mantenimiento. Finalmente, la gerencia de operaciones dispondrá de dichos resultados para orientar la toma de decisiones estratégicas.

Con el fin de visualizar el desempeño alcanzado, en la tabla 17 se propone la elaboración de un Cuadro de Control de Mantenimiento (CCM) en el que se presenten los valores obtenidos de MTTR, MTBF y disponibilidad en relación con los objetivos definidos, por lo que se muestra un ejemplo ilustrativo de este tipo de informe.

Tabla 17. Cuadro Control de Mantenimiento

Mes	Equipo	MTTR (h)	MTBF (h)	Disponibilidad (%)	Meta (%)	Cumplimiento
Enero	Compresor 691	2,3	180	98,7	95	Sí
Enero	Bomba LGLD4	1,8	220	99,2	95	Sí

Nota: Elaboración propia.

La puesta en marcha de un Plan de Mantenimiento Preventivo exige la definición de un mecanismo de control que permita verificar su efectividad y garantizar la confiabilidad de los equipos críticos. Con este propósito, la propuesta contempla la utilización de tres indicadores de gestión ampliamente reconocidos: el tiempo medio para reparar (MTTR), el tiempo medio entre fallas (MTBF) y la disponibilidad operacional. Estos indicadores constituyen una herramienta fundamental para evaluar la mantenibilidad, confiabilidad y disponibilidad de los equipos, siendo aplicados de manera sistemática en procesos industriales con el fin de asegurar la continuidad operativa.

En consecuencia, se plantea una metodología que permita, en primer lugar, verificar el cumplimiento de las actividades de mantenimiento programadas; en segundo lugar, evaluar la confiabilidad de compresores, bombas y motores a partir del análisis de fallas y tiempos de operación y determinar el nivel de disponibilidad alcanzado, de manera que se garantice la continuidad de los procesos de distribución.

El primer indicador de gestión corresponde al MTTR (*Mean Time To Repair*), el cual se calcula como el tiempo total de reparación dividido entre el número de intervenciones correctivas realizadas. Este indicador refleja la rapidez con la que el equipo de mantenimiento es capaz de

restituir la operación tras una falla, por lo que valores reducidos evidencian una mayor eficiencia en los procesos de reparación. En segundo lugar, el MTBF (Mean Time Between Failures) se obtiene al dividir el tiempo total de operación entre el número de fallas ocurridas. Su interpretación se relaciona directamente con la confiabilidad de los equipos, de modo que un incremento en el valor del MTBF indica que las fallas se presentan con menor frecuencia. Finalmente, la disponibilidad operacional resulta de la relación entre el MTBF y la suma de este con el MTTR, expresada en porcentaje. Este indicador representa el tiempo efectivo en que un equipo permanece disponible para operar dentro de un periodo determinado.

En caso de que los indicadores presenten desviaciones negativas con respecto a las metas establecidas, se aplicará un proceso de análisis de causa raíz (RCA) para identificar los factores que originan el problema. A partir de dicho análisis se definirán acciones correctivas que podrán incluir ajustes en la frecuencia de las actividades de mantenimiento preventivo, la sustitución o reparación de componentes críticos o la capacitación técnica adicional para los operarios. De esta manera, el sistema de control propuesto no solo se concibe como un mecanismo de medición, sino como una herramienta que fomente la mejora continua, asegurando la sostenibilidad del plan de mantenimiento en el tiempo.

5.3 Análisis Económico

El análisis económico es una herramienta esencial para determinar la viabilidad financiera de proyectos de mantenimiento industrial, el análisis costo-beneficio permite comparar los costos asociados a la implementación de una propuesta con los beneficios económicos que esta genera, facilitando la toma de decisiones orientadas a la eficiencia y sostenibilidad operativa. Esta metodología resulta especialmente útil en entornos donde la continuidad de las operaciones es crítica, como en las plantas de distribución de Gas Licuado de Petróleo (GLP), ya que posibilita cuantificar el impacto económico de la prevención frente a la corrección.

En este contexto, el análisis económico tiene como objetivo evaluar la viabilidad financiera de la implementación del plan de mantenimiento preventivo para los equipos críticos de trasiego de GLP según datos de la Planta de El Coyol. La implementación de un plan de mantenimiento estructurado conlleva una inversión inicial en recursos, capacitación, documentación y herramientas, pero su justificación radica en los beneficios económicos derivados de la continuidad operativa.

Por motivos de confidencialidad empresarial, no se presenta el desglose exacto de pérdidas, pero se estima que una jornada de inactividad de un día representa aproximadamente ¢55,000,000 en pérdidas. Este monto considera aspectos como la interrupción en la distribución de GLP, penalidades contractuales, costos de reinicio y afectaciones en la continuidad operativa. De esta manera, cualquier inversión que permita reducir el riesgo de una parada imprevista debe analizarse bajo un enfoque costo-beneficio, priorizando la recuperación rápida de la inversión y la disminución de riesgos económicos.

5.3.1 Inversión del proyecto

La inversión inicial contempla tres rubros principales: inventario mínimo de repuestos críticos, consumibles mínimos en bodega y contratación de recurso humano adicional. La inversión inicial contempla tres rubros principales: capacitación del personal técnico, adquisición o importación de repuestos críticos para conformar un inventario mínimo.

La correcta implementación del plan de mantenimiento preventivo propuesto requiere garantizar la disponibilidad inmediata de repuestos críticos para los equipos involucrados en el trasiego de GLP. La experiencia operativa y el análisis técnico realizado evidencian que la falta de estos repuestos incrementa significativamente los tiempos de paro no programado, limita la capacidad de respuesta ante fallas y eleva el riesgo operativo del sistema.

Dado que los equipos críticos, como bombas y compresores, cumplen una función esencial dentro del proceso y operan bajo condiciones exigentes de presión y continuidad, se definió como criterio técnico mantener un repuesto crítico por cada equipo instalado. Esta decisión permite ejecutar de forma oportuna tanto mantenimientos preventivos mayores como intervenciones correctivas, sin depender de tiempos de importación, disponibilidad de proveedores o restricciones logísticas.

La propuesta de inventario no responde a una acumulación excesiva de repuestos, sino a un enfoque preventivo basado en criticidad. Los componentes seleccionados corresponden a elementos internos cuya falla implica la salida de funcionamiento inmediata del equipo y que, por su diseño, no admiten reparaciones parciales sin sustitución. Contar con estos repuestos en bodega permite reducir el tiempo fuera de servicio, mejorar la confiabilidad del sistema y mantener la continuidad operativa de la planta.

Asimismo, esta estrategia facilita la planificación del mantenimiento, ya que permite programar intervenciones sin la incertidumbre asociada a la disponibilidad de componentes. En el caso de los

equipos de trasiego de GLP, donde la seguridad industrial es prioritaria, la reducción de trabajos de emergencia también disminuye la exposición del personal a condiciones de riesgo.

En la tabla 18 se presenta el inventario mínimo de repuestos críticos necesarios para la implementación del plan de mantenimiento preventivo en los equipos de trasiego de GLP.

Tabla 18. Inventario mínimo de repuestos críticos

Descripción	Cantidad	Costo unitario (C\$)	Subtotal (C\$)
Camisa 185111 para bomba Blackmer 3"	2,00	386 970,25	773 940,50
Kit reparación 898981 para bomba Blackmer 3"	2,00	954 112,03	1 908 224,06
Rotor de eje 265148 para bomba Blackmer 3"	2,00	539 863,35	1 079 726,70
Kit reparación 898922 para bomba Blackmer 4"	2,00	1 183 531,21	2 367 062,42
Camisa 182000 para bomba Blackmer 4"	2,00	546 253,75	1 092 507,50
Rotor 262041 para bomba Blackmer 4"	2,00	1 345 156,29	2 690 312,58
Kit reparación 35552-X4 para compresor Corken 691	1,00	1 522 575,00	1 522 575,00
Kit reparación 3551-X1 para compresor Corken 490	1,00	1 218 060,00	1 218 060,00
Total inventario de repuestos críticos			12 652 408,76

Nota: Elaboración propia.

La Tabla 19 detalla los consumibles mínimos que deben mantenerse en bodega para respaldar las actividades de mantenimiento preventivo. La disponibilidad de aceites, grasas y otros insumos permite realizar intervenciones programadas de manera eficiente, evitando retrasos en los procedimientos y optimizando el desempeño de los equipos.

Tabla 19. Consumibles mínimos en bodega

Descripción	Cantidad	Costo unitario (₡)	Subtotal (₡)
Aceite Sta-Lube SAE 30 (cuarta)	10	10 833,33	108 333,30
Grasa Multipropósito Sta-Lube 14 oz (cartucho)	5	6 531,40	32 657,00
Total consumibles en bodega			140 990,30

Nota: Elaboración propia.

El análisis de carga laboral permitió determinar que la ejecución del plan de mantenimiento propuesto requerirá un total de 2120 horas anuales, considerando tanto las actividades de mantenimiento preventivo como las intervenciones con paro programado. Dado que un técnico dispone de aproximadamente 1 997 horas efectivas al año, se estima una demanda equivalente a 1,06 técnicos, lo que implica una ligera sobrecarga del 6 %. Por lo tanto, se recomienda la incorporación de un ayudante GLP que brinde soporte operativo durante las semanas de mayor demanda, optimizando la distribución del trabajo y asegurando la continuidad de las actividades de mantenimiento sin afectar la operación regular de la planta.

La Tabla 19 describe el costo asociado a la incorporación de un recurso humano adicional, específicamente un ayudante de GLP, destinado a apoyar las tareas del plan de mantenimiento. Este recurso contribuye a asegurar la ejecución oportuna de las actividades, así como a optimizar la carga de trabajo del personal técnico existente.

Tabla 20. Recurso humano adicional (ayudante GLP)

Concepto	Cálculo	Costo (₡)
Costo empleado anual	679 410,00 × 12 meses	8 152 920,00
Uniforme anual	-	52 304,00
Equipo de protección personal (EPP)	-	30 032,01
Total costo anual ayudante GLP		8 235 256,01

Nota: Elaboración propia.

En la tabla 21 se resume la inversión total requerida para implementar el plan de mantenimiento preventivo, integrando repuestos críticos, consumibles y recurso humano adicional. Esta inversión constituye un aporte estratégico para minimizar el riesgo de paros no programados, con un retorno proyectado inmediato al prevenir pérdidas económicas significativas derivadas de interrupciones en la operación.

Tabla 21. Inversión total del proyecto

Concepto	Costo (€)
Inventario mínimo de repuestos críticos	12 652 408,76
Consumibles mínimos en bodega	140 990,30
Recurso humano adicional	8 235 256,01
Inversión total propuesta	21 028 655,07

Nota: Elaboración propia.

La inversión inicial representa un costo fijo en adquisición de repuestos, consumibles y recursos humanos, incluyendo la capacitación aplicada en campo. Se proyecta un retorno inmediato al evitar incluso un único paro de un día, considerando que una jornada de inactividad puede generar pérdidas superiores a €55,000,000. Este retorno convierte al plan en financieramente viable y altamente rentable para la empresa. Además, se espera que la implementación optimice el uso de la mano de obra, reduzca reprocesos, mejore la eficiencia operativa y disminuya los riesgos asociados a la seguridad industrial.

5.3.2 Análisis financiero

El análisis financiero se centra en los beneficios derivados de la reducción de pérdidas operativas por paros no programados, así como en la optimización de los recursos internos. La Tabla 22 presenta la relación entre la inversión del proyecto y las pérdidas económicas que se evitan gracias a la implementación del plan de mantenimiento. Este análisis evidencia que la inversión representa aproximadamente el 29% del valor estimado de una jornada de inactividad, valor calculado con base en la producción promedio diaria de la planta y su correspondiente valor económico.

Tabla 22. Relación costo-beneficio

Concepto	Valor (C\$)
Pérdida económica por 1 día de inactividad	55 000 000,00
Inversión total propuesta	21 028 655,07
% de la inversión respecto a la pérdida	38,23%
Beneficio estimado (ahorro neto si se evita 1 día de parada)	33 971 344,93

Nota: Elaboración propia.

El análisis señala que la inversión necesaria para ejecutar el plan de mantenimiento preventivo representa únicamente el 38,23% del costo asociado a una jornada de inactividad de la planta. Esto significa que, si el plan logra evitar al menos un solo día de paro no programado al año, la empresa recuperaría completamente su inversión inicial y obtendría un ahorro neto de C\$ 33,9 millones.

5.3.2.1 Retorno de la Inversión

El Retorno sobre la Inversión (ROI) es un indicador que permite medir la rentabilidad de un proyecto en términos porcentuales y se calcula como el cociente entre el beneficio neto y la inversión total, multiplicado por cien. En este caso, el beneficio neto de C\$ 33 971 344,93 dividido entre la inversión de C\$ 21 028 655,07, multiplicado por cien, resulta en un ROI de 161,6 %. Este valor indica que, por cada colón invertido en la implementación del plan de mantenimiento, la empresa obtiene C\$ 1,62 de retorno neto.

La interpretación de este resultado permite afirmar que la inversión se recupera rápidamente y genera un excedente económico significativo, lo que respalda la decisión de ejecutar el plan como una medida económicamente rentable y eficiente para la planta del Coyal.

En la siguiente figura 31 se detalla el cálculo del ROI.

Figura 31. ROI

$$ROI = \frac{\text{C} \$ 33\,971\,344,93}{\text{C} \$ 21\,028\,655,07} * 100 = 161,6\%$$

Nota: Elaboración propia.

5.3.2.2 Periodo de recuperación de la inversión

El periodo de recuperación o payback permite determinar el tiempo necesario para que la inversión genere beneficios equivalentes a su monto inicial. En este caso, considerando que el beneficio económico estimado por evitar un día de inactividad es de C \$ 55 000 000 y el payback se calcula dividiendo la inversión de C \$ 21 028 655,07 entre dicho beneficio, obteniéndose un periodo de recuperación aproximado de 0,38 años, equivalente a 4,6 meses. Este resultado indica que la inversión se recupera en un tiempo relativamente corto, lo que refuerza la viabilidad del proyecto y demuestra que los recursos destinados al plan de mantenimiento se recuperan rápidamente mediante la reducción de pérdidas económicas.

La figura 32 detalla el cálculo de del payback.

Figura 32. Payback

$$Payback = \frac{\text{C} \$ 21\,028\,655,07}{\text{C} \$ 55\,000\,000} = 0,38 \text{ años} \approx 4,6 \text{ meses}$$

Nota: Elaboración propia.

Además del ahorro económico directo, la implementación del plan de mantenimiento preventivo contribuye a mejorar la operación de la planta de manera integral. La reducción de fallas imprevistas incrementa la confiabilidad de los equipos críticos, mientras que la mayor disponibilidad operativa, superior al 95 %, asegura la continuidad del servicio sin afectar la capacidad productiva de la planta. La disminución de costos asociados a reparaciones de emergencia permite optimizar la utilización de recursos humanos y materiales, y la aplicación sistemática de procedimientos preventivos fortalece la seguridad operativa y ambiental, reduciendo los riesgos de accidentes y emisiones. En conjunto, estos beneficios indirectos complementan los impactos económicos y refuerzan la sostenibilidad del plan de mantenimiento.

5.3.2.3 Valor Actual Neto (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN) ayuda a determinar el valor presente de los beneficios económicos generados por el plan de mantenimiento preventivo. En el presente análisis contable se adoptan los lineamientos establecidos en la Directriz CN-001-2009, denominada “Valoración, Revaluación y Depreciación de Propiedad, Planta y Equipo”, emitida por la Contabilidad Nacional en cumplimiento de la Ley de la Administración Financiera de la República y Presupuestos Públicos N° 8131, la cual es de acatamiento obligatorio, se propone un horizonte de 10 años, en concordancia con la vida útil estimada de los equipos críticos involucrados en la operación de trasiego de GLP.

Este periodo permite reflejar de manera realista los beneficios económicos derivados de la reducción de paradas no programadas y de la implementación del plan de mantenimiento preventivo, asegurando que los flujos de efectivo proyectados correspondan al tiempo durante el cual los equipos generarán valor para la empresa, descontando los flujos de caja al valor actual mediante la tasa de descuento establecida.

Para la determinación de la tasa de descuento utilizada en el análisis financiero de este proyecto, se ha seleccionado un valor del 10 % anual. Esta elección se fundamenta en las tasas históricas de préstamos industriales en Costa Rica, publicadas por el Banco Central de Costa Rica, donde la Tasa Activa Negociada (TAN) para el sector industrial ha fluctuado entre 8 % y 9 % anual en los últimos años. El ajuste al 10 % se justifica por dos razones principales: primero, permite incorporar un margen conservador que refleje riesgos asociados al proyecto y variaciones futuras en el costo del financiamiento

En este caso, la inversión inicial es de ₡ 21 028 655,07 y el beneficio anual esperado por evitar un día de inactividad de la planta es de ₡ 55 000 000,00. Aplicando una tasa de descuento del 10 % y considerando un flujo constante durante 10 años, el VAN se calcula usando la fórmula vista en la Figura 9, sustituyendo los valores del proyecto: Valor presente de los beneficios = ₡ 55 000 000 × $[(1 - (1 + 0,10)^{-10}) / 0,10]$ = ₡ 337 953 000,00, VAN = ₡ 337 953 000,00 - ₡ 21 028 655,07 = ₡ 316 924 344,93

El VAN positivo confirma que la implementación del plan genera un valor económico significativo a lo largo de su vida útil, demostrando que la inversión inicial se recupera y produce un beneficio neto considerable.

5.3.2.4 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) corresponde a la tasa de descuento que hace que el VAN del proyecto sea igual a cero. Este indicador permite evaluar la rentabilidad relativa del proyecto en términos porcentuales. Usando la Figura 10, sustituyendo los valores del proyecto y resolviendo mediante hoja de cálculo: $0 = -\text{C} 21\ 028\ 655,07 + \sum [\text{C} 55\ 000\ 000 / (1 + \text{TIR})^n]$ para $n = 1 \dots 10$, el resultado es una TIR aproximada de **260 %**, indicando que la inversión genera un retorno muy superior a la tasa de descuento utilizada.

5.3.3 Análisis de fuentes de financiamiento

En la tabla 23 se muestran las diferentes alternativas de financiamiento disponibles para la inversión en mantenimiento preventivo, considerando ventajas y desventajas de cada opción. Este análisis permite seleccionar la modalidad que optimice los recursos de la empresa, asegurando un retorno rápido de la inversión y un riesgo financiero controlado.

Tabla 23. Opciones de financiamiento

Opción	Ventajas	Desventajas
Recursos propios	Liquidez inmediata, sin costo financiero, retorno rápido.	Reduce temporalmente el flujo de caja disponible.
Reasignación presupuestaria	No genera endeudamiento, aprovecha recursos ya asignados.	Podría afectar otros rubros operativos.
Crédito a corto plazo	No afecta liquidez, costo bajo por retorno rápido.	Genera intereses y dependencia externa.
Esquema híbrido	Balance entre recursos propios y crédito.	Requiere gestión administrativa adicional.

Nota: Elaboración propia.

El análisis costo-beneficio demuestra que la implementación del plan de mantenimiento preventivo es altamente rentable, económicamente viable y estratégicamente recomendable para Z Gas Costa

Rica. La inversión requerida representa una fracción menor al costo de un día de inactividad, el periodo de recuperación es inferior a cuatro meses, y el ROI supera el 240 %.

Los resultados financieros del análisis a 10 años evidencian la alta rentabilidad y viabilidad económica del plan de mantenimiento preventivo. El VAN de ¢ 316 924 344,93 y la TIR de 260 % demuestran que la inversión inicial se recupera rápidamente y que los beneficios se mantienen sostenibles a lo largo del tiempo.

Esos resultados apuntan a que el plan no solo asegura la continuidad operativa de los equipos críticos, sino que también genera beneficios económicos directos e indirectos que fortalecen la sostenibilidad de la planta. Por tanto, la aplicación del plan de mantenimiento preventivo constituye una decisión financiera sólida y justificada, que optimiza la eficiencia operativa y protege los recursos de la empresa.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente capítulo reúne las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación, en concordancia con los objetivos planteados al inicio. En ese orden, las primeras sintetizan los principales hallazgos obtenidos en el diagnóstico y en la propuesta de un plan de mantenimiento preventivo para los equipos críticos de distribución en Z Gas Costa Rica, subrayando los aspectos más relevantes en términos de disponibilidad, confiabilidad y seguridad operativa. Posteriormente, se presentan las recomendaciones correspondientes, orientadas a la aplicación práctica de los resultados, al fortalecimiento de la gestión de mantenimiento y a la promoción de la mejora continua en la planta de distribución.

6.1 Conclusiones

1. El análisis de la gestión de mantenimiento demuestra que la aplicación de un plan preventivo constituye una práctica esencial para mantener la confiabilidad y disponibilidad de los equipos críticos en Z Gas Costa Rica. La propuesta desarrollada integra procedimientos estandarizados, cronogramas definidos y mecanismos de control acordes con las normas internacionales de mantenimiento, lo que permite una administración más eficiente de los recursos y una mayor estabilidad operativa.
2. La identificación y caracterización de los equipos críticos tales como compresores, bombas y motores acoplados, confirman su función determinante en el sistema de trasiego de gas LP. Este diagnóstico técnico contribuye a priorizar las acciones de mantenimiento de acuerdo con su nivel de impacto sobre la continuidad del servicio, cumpliendo con los principios de criticidad y confiabilidad establecidos en la gestión moderna de activos industriales.
3. Los resultados alcanzados evidencian que las fallas no controladas generan pérdidas económicas y riesgos para la seguridad operativa, aspecto que reafirma la importancia del mantenimiento preventivo como estrategia para reducir paros no programados y garantizar la continuidad del suministro. La aplicación sistemática de prácticas preventivas permite optimizar los tiempos de intervención y mantener la operación dentro de márgenes seguros y rentables.
4. El estudio de las causas de fallas demuestra que la recurrencia de averías se asocia principalmente con la falta de protocolos documentados y el uso limitado de registros

técnicos. Este hallazgo señala la necesidad de fortalecer la gestión del mantenimiento mediante procedimientos formalizados, control de repuestos críticos y registro de intervenciones, favoreciendo la trazabilidad y la mejora continua sin atribuir responsabilidades individuales.

5. El plan de mantenimiento preventivo diseñado permite trasladar los fundamentos teóricos a la práctica operativa de la planta, estableciendo una guía estructurada para la ejecución de actividades periódicas en los equipos críticos. La propuesta define frecuencias, tiempos estimados, recursos y responsabilidades, facilitando una gestión más organizada, una mayor disponibilidad de los equipos y una cultura orientada a la prevención.
6. La incorporación de indicadores técnicos como MTTR, MTBF y disponibilidad operacional ayudan a evaluar de forma continua la efectividad del plan de mantenimiento. Estos indicadores fortalecen el control de la gestión, facilitan la detección de desviaciones y consolidan un proceso de mejora continua que asegura la sostenibilidad técnica y operativa de la empresa.
7. El VAN positivo confirmado por un total de ¢ 316 924 344,93 y la TIR aproximada de **260 %**, indican que la implementación del plan no solo previene pérdidas económicas inmediatas, sino que también constituye una decisión estratégica de largo plazo, optimizando los recursos financieros de la planta que garantiza la continuidad operativa de manera eficiente y segura.

6.2 Recomendaciones

1. Se recomienda implementar gradualmente el plan de mantenimiento preventivo propuesto, priorizando, en primera instancia, los equipos de mayor criticidad. Su puesta en marcha debe acompañarse de capacitaciones técnicas al personal, enfocadas en los nuevos procedimientos y medidas de seguridad. De igual modo, la jefatura de mantenimiento debe realizar un seguimiento constante para validar el cumplimiento de las frecuencias, tiempos y recursos definidos. Se sugiere efectuar una evaluación semestral de resultados, de manera que el plan se mantenga ajustado a las condiciones reales de operación y a las necesidades de la planta.
2. Es recomendable mantener actualizada la información técnica de los equipos críticos, incluyendo su caracterización, historial de intervenciones y registros de fallas. Para ello, se

sugiere utilizar herramientas digitales que faciliten la trazabilidad de datos y la generación de reportes automáticos. Este proceso debe ejecutarse al menos una vez por año y documentarse en registros oficiales de la empresa, garantizando que las estrategias de mantenimiento reflejen el estado operativo real de los equipos y se evite la obsolescencia del plan.

3. Se aconseja fortalecer los protocolos de mantenimiento desarrollados en la propuesta, asegurando su aplicación uniforme en las labores de inspección, reparación y lubricación de los equipos críticos. Adicionalmente, se recomienda mantener actualizado el inventario mínimo de repuestos y consumibles, de manera que la planta disponga de los recursos necesarios para atender emergencias sin afectar la continuidad del servicio. A su vez, se sugiere reforzar la capacitación del personal técnico en la identificación temprana de síntomas de falla y en la ejecución correcta de los procedimientos establecidos, promoviendo una cultura preventiva y de mejora continua.
4. Se recomienda garantizar el cumplimiento estricto de las actividades establecidas en el plan de mantenimiento, verificando que cada tarea se realice con la frecuencia, herramientas y parámetros de control definidos. Para asegurar la trazabilidad, se debe establecer un calendario oficial de mantenimiento aprobado por la gerencia de operaciones con el que se asignen responsabilidades y se registren los avances. Dicha medida permite evaluar la efectividad del plan y corregir desviaciones a tiempo por medio de inspecciones internas periódicas.
5. Se sugiere consolidar un sistema de control integral basado en indicadores de desempeño, incorporando métricas como MTTR, MTBF y disponibilidad operacional dentro de los informes regulares de la planta. Estos indicadores deben monitorearse mensualmente y presentarse en reuniones de seguimiento con la gerencia. Además, se recomienda incluir indicadores de seguridad, como el número de incidentes asociados a fallas mecánicas, horas sin accidentes y porcentaje de cumplimiento de mantenimientos preventivos, con el fin de evaluar simultáneamente la confiabilidad técnica y la seguridad operativa del sistema.
6. Se recomienda utilizar recursos propios de la empresa para la ejecución del plan de mantenimiento, dado que la inversión requerida presenta una rápida recuperación y un riesgo financiero limitado. Esta medida permite optimizar la asignación de fondos internos,

fortalecer la autonomía del área de mantenimiento y asegurar la sostenibilidad económica del proyecto en el mediano plazo.

APÉNDICES

Figura 33. Compresor Corken 691

Nota: Elaborado por Retana Madrigal Steven

Figura 34. Compresor Corken 490

Nota: Elaborado por Retana Madrigal Steven

Figura 35. Bombas Blackmer



Nota: Elaborado por Retana Madrigal Steven

Figura 36. Análisis de Criticidad

Unidad Funcional (Equipo + Motor)	Seguridad (x0.4)	Operatividad (x0.3)	Costo (x0.2)	Falla Histórica (x0.1)	Puntuación Total	Nivel de Criticidad
Compresor Corken 691 + Motor AEHHXU	5	5	4	3	4.6	Muy Crítico
Compresor Corken 490 + Motor (sin identificar)	4	4	4	2	3.8	Crítico
Bomba LGLD3E + Motor Baldor BZ610444	5	5	3	3	4.4	Muy Crítico
Bomba LGLD4 #1 + Motor (sin identificar)	4	5	4	2	4.1	Muy Crítico
Bomba LGLD4 #2 + Motor (sin identificar)	4	5	4	2	4.1	Muy Crítico
Bomba LGLD3F + Motor Baldor CB469659	4	5	4	3	4.2	Muy Crítico

Nota: Elaborado por Retana Madrigal Steven

Figura 37. Mantenimiento Compresores Corken

Item to Check	Daily	Weekly	Monthly	Six Months	Yearly
Crankcase oil pressure	●				
Compressor discharge pressure	●				
Overall visual check	●				
Crankcase oil level			● ¹	● ¹	
Drain liquid from accumulation points	● ²				
Drain distance pieces	●				
Clean cooling surfaces on compressor and intercooler (if any)		●			
Lubricator supply tank level (if any)		●			
Check belts for correct tension			●		
Inspect valve assemblies				●	
Lubricate motor bearings in accordance with manufacturers' recommendations				●	
Inspect motor starter contact points					●
Inspect piston rings ¹				● ³	

¹ Change oil every 2,200 hours of operation or every 6 months, whichever occurs first. If the oil is unusually dirty, change it as often as needed to maintain a clean oil condition. Change replacement filter 4225 with every oil change.

² Liquid traps should be drained prior to startup.

³ Piston ring life varies greatly, depending on application, gas, and operating pressures. Consult factory for additional recommendations for your specific application.

Nota: Tomado de manuales de fabricante

Figura 38. Kits de Reparación y Mantenimiento Compresores Corken

Part Number	3549-X1	3550-X1	3551-X1	3552-X1	3552-X4	5578-X3A
Model Number	90J3, 91J3	290K3, 291M3	490K3, 491M3	690K3, 690P3	690M3, 691M3	891M3
Suction valve assembly	3483-1X	3483-1X (2)	2532-1X	3948-X (2)	3948-2X (2)	3856-2X (4)
Discharge valve assembly	3485-X	3485-X (2)	2439-X (2)	3857-X (2)	3857-2X (2)	3857-2X (4)
Connecting rod bearing (pair)	1367	1367 (2)	1491 (2)	1719 (2)	3542 (2)	3542 (2)
Packing set	1452-1X1	1452-1X1 (2)	1452-1X1 (2)	1725-2X (2)	1725-2X (2)	1725-2X, 3810-X1
Piston rings	1772 (3)	1772 (6)	1773 (6)	1739 (6)	1739 (6)	1739 (8)
Ring expanders	1775 (3)	1775 (6)	1776 (6)	1740 (6)	1740 (6)	1740 (8)
Gasket set ^b	2526-XA	1281-XA	1481-X6A	1744-X1A	1744-X1A	3970-X1A
O-ring ^b	—	—	—	—	2-261A (2)	—
O-ring ^b	—	—	2-242A (2)	—	—	—
O-ring ^b	—	—	2-253A (2)	—	—	—
Oil seal	3259	1278	1507 (490 only)	—	3526	3526
Oil seal	—	—	4438 (491 only)	—	—	—
Adapter plate gasket	—	—	1486 (2)	—	—	—
Oil deflector ring	—	—	—	—	—	1732 (2)

^a Quantities greater than one are shown in parenthesis.

^b All repair kits are furnished with Buna-N O-rings which are suitable for LPG and NH₃ applications.

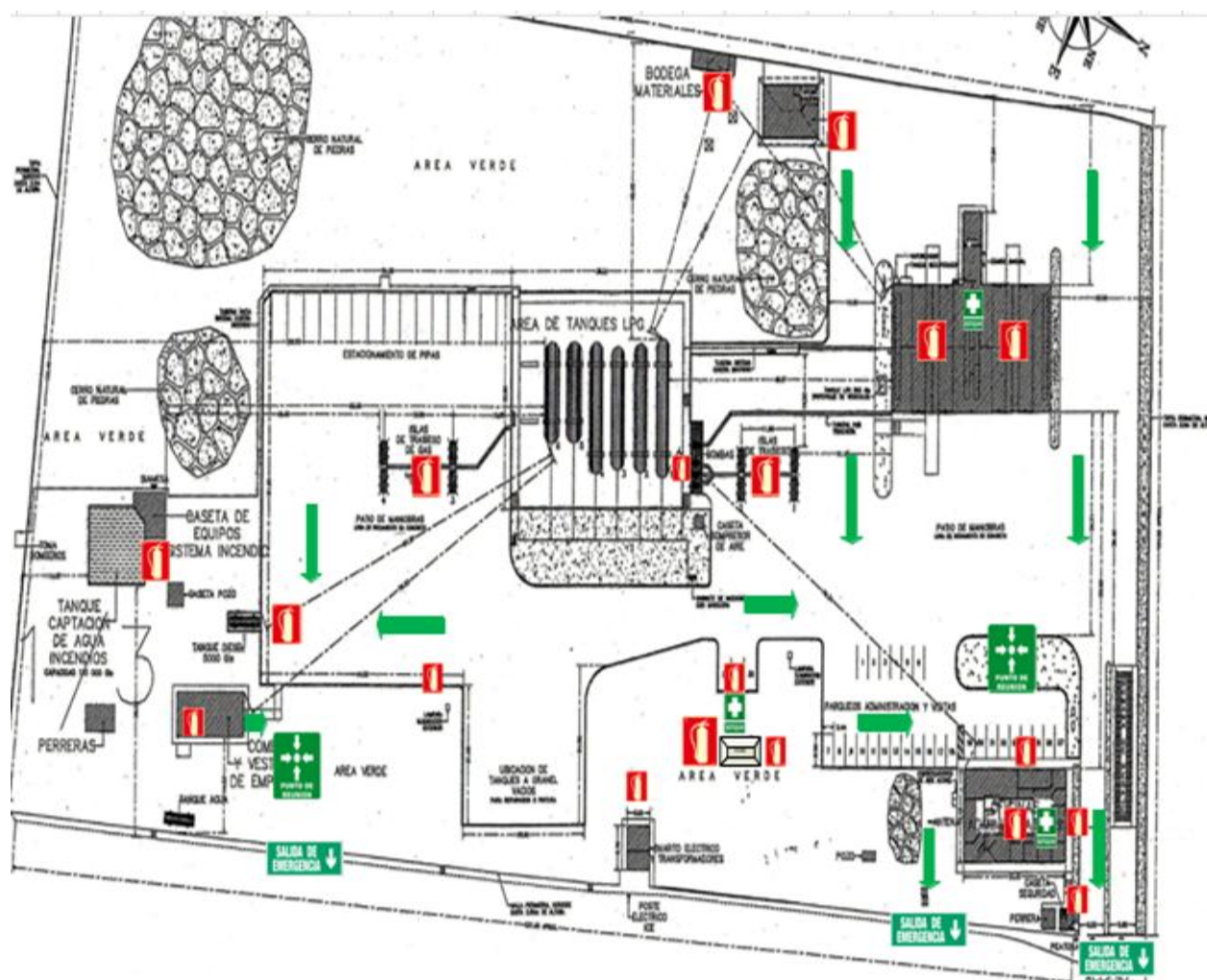
Nota: Tomado de manuales de fabricante

Figura 39. Kits de Reparación y Mantenimiento Bombas Blackmer

MODEL(S)	DESCRIPTION	PART NUMBER
LGLD2, LGL2	Kit - Maintenance	898979
LGLD2	Kit - Rebuild	899079
LGLD3, LGL3	Kit - Maintenance	898981
LGLD3	Kit - Rebuild	899081
LGLD4, LGL4	Kit - Maintenance	898922
LGLD4	Kit - Rebuild	899022

Nota: Tomado de manuales de fabricante

Figura 40. Detalle de Planta Coyol



Nota: Tomado de Z Gas Costa Rica.

Figura 41. Cálculo de Cargas Sociales

Salario Bruto	%	¢450 000,00
Preaviso	4,17%	¢18 765,00
Patron	26,33%	¢118 485,00
Aguinaldo	8,30%	¢37 350,00
INS	3,02%	¢13 590,00
Vacaciones	3,83%	¢17 235,00
Cesantía	5,33%	¢23 985,00
Costo Total	50,98%	¢679 410,00

Nota: Elaborado por Retana Madrigal Steven

Figura 42. Formula del ROI

$$ROI = \frac{\text{Beneficio Neto}}{\text{Inversión}} * 100$$

Nota: Tomado de *Maintenance engineering handbook*.

REFERENCIAS

Artículos Científicos

- Arroyo, C., Y Obando, R. (2020). *Importancia de la implementación de mantenimiento preventivo en las plantas de producción para optimizar procesos*. E-IDEA Journal of Engineering Science, 4(10), 59-69. doi:10.53734/esci.vol4.id240
- Fábregas, J., Díaz, L., Medina, C., Y Buelvas, E. (2020). *Gerencia del mantenimiento enfocada en la industria de compresión de gas natural*. Revista Venezolana de Gerencia, 25(90), 38-55. doi:<https://doi.org/10.52080/rvgluz.28.e10.38>
- Moreano-Castillo, F., Y Pérez-Vega, E. (2020). *Plan de mantenimiento preventivo para la mejora del índice de falla de un sistema de transporte neumático*. Dominio de las Ciencias, 6(4), 307-323. doi:<https://doi.org/10.23857/dc.v6i4.1469>
- Rodríguez, R. (2020). *Tipos de mantenimiento en las plantas compresoras de gas del municipio Simón Bolívar*. DataCiencia, 2(1), 143-161. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/dataciencia/article/view/32818>
- Roncero, C., Y Pomblas, R. (2023). *Modelo de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad Operacional para una Planta Compresora de Gas*. Revista Politécnica, 51(1), 117-129. doi:<https://doi.org/10.33333/rp.vol51n1.10>

Páginas Web

- American Society of Mechanical Engineers. (2021). *Código ASME Sección VIII, División 1: Recipientes a presión*. Nueva York: ASME. <https://www.asme.org>
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (2021). *Reglamento para el transporte, almacenamiento y distribución de gas licuado de petróleo*. Decreto Ejecutivo N.º 43567. San José: Sistema costarricense de información jurídica. <https://www.pgrweb.go.cr>
- Asociación Iberoamericana de Gas Licuado [AIGLP]. (2020). *Manual de seguridad para el manejo de gas licuado de petróleo*. Buenos Aires. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://aiglp.org/src/uploads/2020/08/manual_compliance_aiglp_web.pdf

- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55000: Asset management – Overview, principles and terminology. Norma ISO 55000:2014*. Ginebra: ISO. <https://www.iso.org>
- International Organization for Standardization. (2016). *ISO 14224: Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. Norma ISO 14224:2016*. Ginebra: ISO. <https://www.iso.org>
- Ministerio de Hacienda de Costa Rica. (2009). *Valoración, Renovación, Depreciación de la Propiedad, Planta y Equipo*. San José: Sistema costarricense de información jurídica. https://pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=67206&nValor3=79528&strTipM=TC
- National Fire Protection Association. (2020). *NFPA 58: Liquefied Petroleum Gas Code. Edición 2020*. Quincy: NFPA. <https://www.nfpa.org>
- Organización Internacional de Normalización. (2015). *ISO 9001:2015 Sistemas de gestión de la calidad – Requisitos*. Ginebra: ISO. <https://www.iso.org/standard/62085.html>

Libros

- Heizer, J., & Render, B. (2014). *Principios de administración de operaciones*. (Novena ed.). Pearson Educación. <https://matrixeducacion.com/wp-content/uploads/2023/07/Libro-5-Heizer-and-Render-Principios-de-Operaciones.pdf>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. (Sexta ed.). McGraw-Hill Education. https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- Mobley, K. (2014). *Maintenance Engineering Handbook* (Octava ed.). McGraw-Hill Education. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.accessengineeringlibrary.com/binary/mheaeworks/01f8478b9bba6931/b0ae49eb6e0bd3f3b5f6ba94ed539ffe80954f66380fa0141e29a6fe4ddee12b/book-summary.pdf>

- Montgomery, D., & Runger, G. (2018). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. (Sétima ed.). Limusa Wiley. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dl.icdst.org/pdfs/files4/57ca3651c10165f7b64ff0dadf4d4f10.pdf
- Montilla, C. (2019). *Mantenimiento Industrial y su Administración* (Primera ed.). Editorial UTP. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://core.ac.uk/download/288157713.pdf
- Nahmias, S., & Lennon, T. (2015). *Production and Operations Analysis* (Sétima ed.). Waveland Press. https://books.google.co.cr/books?id=SIsoBgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Ross, S. A., Westerfield, R. W., Jaffe, J., & Jordan, B. D. (2021). *Corporate Finance* (Doceava ed.). McGraw-Hill US. <https://studylib.net/doc/27020171/-book--corporate-finanace-12e>
- Vilardell, E. (2022). *Mantenimiento industrial práctico* (Segunda ed.). Fidestec Ediciones. https://books.google.co.cr/books?id=NcVvEAAAQBAJ&pg=PA7&source=gbs_toc_r&cad=2#v=onepage&q&f=false

Tesis

- Alvarado, C., Rodríguez, M., Y Soto, M. (2024). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la empresa Na Lakalú [Licenciatura en Ingeniería Industrial, Universidad de Costa Rica, Costa Rica]*. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/items/ea8550f0-85a0-4992-9c22-cf31b941483b>
- Araya, J., Jara, E., Y Pastrana, A. (2020). *Diseño de un plan estratégico de mantenimiento basado en la filosofía TPM, para el área de planta de complejos en la empresa FERTICA S.A. [Licenciatura en Ingeniería Industrial, Universidad Técnica Nacional, Costa Rica]*. https://kimuk.conare.ac.cr/Record/RUTN_c9edd3ab3eb277252dd4e3edb6ac4292
- Brenes-Cano, V. (2022). *Proceso para la mejora del plan de mantenimiento preventivo y confección de un procedimiento de mantenimiento de edificaciones para las instalaciones*

de Paradise Ingredients [Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica]. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/14390>

Contreras, R. (2023). *Propuesta de mejora financiera en el sistema de costos de mantenimiento para incrementar la rentabilidad de este servicio en un complejo turístico en Costa Rica [Licenciatura en Ingeniería Industrial, Universidad de Costa Rica, Costa Rica].* <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/items/fc9f8cbd-f16c-439b-8176-592e79597ae4>

Porras, J., Y López, Q. (2023). *Rediseño del plan de mantenimiento para el área de Ingeniería y Mantenimiento del Hospital Carlos Luis Valverde Vega [Licenciatura en Ingeniería Industrial, Universidad de Costa Rica, Costa Rica].* <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/items/6a302601-8ddb-4a4f-96b7-5c3b77586f62>