

Implementación del RCM y automatización en el mantenimiento de válvulas neumáticas de separadores trifásicos en well testing

Diego Armando Rojas Vanegas

Asesor

Derney Eduardo Sosa Marentes

Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e ingeniería

Cadena de Ingeniería Industrial

2025

Resumen

La operación eficiente de los separadores trifásicos en procesos de Well Testing es esencial para garantizar la seguridad y el rendimiento en la industria de los hidrocarburos. Sin embargo, se ha identificado que las válvulas neumáticas de estos equipos presentan un alto índice de desgaste debido a la ausencia de un plan de mantenimiento sistemático, lo que genera fallas recurrentes, pérdidas de producto y condiciones operativas inseguras. En este contexto, el presente proyecto propone la implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) combinado con un proceso de automatización para optimizar el mantenimiento de estas válvulas.

El objetivo principal es diseñar e implementar una estrategia de mantenimiento basada en confiabilidad que permita anticipar fallos, reducir paradas no programadas y prolongar la vida útil de los componentes críticos. La metodología contempla un diagnóstico inicial del estado de las válvulas, el análisis funcional de los equipos, la evaluación de modos de falla y la aplicación del análisis de criticidad. Asimismo, se incluirá el desarrollo de propuestas de automatización que faciliten el monitoreo continuo y el control en tiempo real.

Se espera como resultado la mejora en la eficiencia operativa del separador trifásico, la reducción de costos asociados a fallas correctivas y un aumento en la seguridad del entorno de trabajo. Este enfoque integral contribuirá a establecer un modelo de mantenimiento replicable en otras instalaciones de producción.

Palabras claves: Automatización industrial, Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), well testing

Abstract

The efficient operation of three-phase separators in Well Testing processes is essential to ensure safety and performance in the oil and gas industry. However, it has been identified that the pneumatic valves in these systems exhibit a high rate of wear due to the absence of a systematic maintenance plan, leading to recurring failures, product losses, and unsafe operating conditions. In this context, the present project proposes the implementation of Reliability-Centered Maintenance (RCM) combined with an automation process to optimize the maintenance of these valves.

The main objective is to design and implement a reliability-based maintenance strategy that anticipates failures, reduces unplanned shutdowns, and extends the lifespan of critical components. The methodology includes an initial diagnosis of the valve conditions, functional analysis of the equipment, failure mode evaluation, and criticality analysis. In addition, automation proposals will be developed to enable continuous monitoring and real-time control. The expected outcomes include improved operational efficiency of the three-phase separator, reduced costs associated with corrective failures, and increased safety in the working environment. This comprehensive approach will contribute to establishing a replicable maintenance model in other production facilities.

Keywords: Industrial automation, Reliability-Centered Maintenance (RCM), Well Testing

Tabla de contenido

Introducción	10
Justificación.....	12
Objetivos	14
Objetivo General.....	14
Objetivos Específicos	14
Definición del Problema.....	16
Antecedente del Problema.....	17
El Planteamiento del Problema	18
Antecedentes y Evidencia del Problema	19
Hipótesis.....	20
Pregunta de investigación.....	20
Descripción del Problema	20
Marco Referencial	22
Antecedentes de la Investigación.....	22
Vacíos de investigación y contexto específico en separadores trifásicos	23
Marco Teórico.....	24
Introducción al Mantenimiento Industrial.....	24
Fundamentos del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)	24
Aplicación del RCM en válvulas de control neumáticas del separador trifásico	26
Modos de Falla de las Válvulas de Control Neumáticas.....	27
Beneficios del RCM en la Industria de Hidrocarburos.	29
Marco Normativo Aplicado al Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)	31

Marco Conceptual.....	32
Definición de Conceptos Claves	32
Principales Modos de Falla en Válvulas de Control Neumáticas	33
Relación entre el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y la Confiabilidad Operacional	34
Beneficios de la Aplicación del RCM en la Industria de Hidrocarburos	35
Metodología	36
Enfoque Metodológico	36
Tipo de Investigación	37
Procedimiento Metodológico	37
Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	38
Variables del Estudio	39
Análisis de Datos	40
Limitaciones del Estudio	41
Análisis Y Resultados.....	42
Evaluación Comparativa de Condiciones Antes y Después del RCM	42
Condiciones Operativas.....	43
Modos de Falla Identificados	44
Análisis de Criticidad	45
Caso Específico: Válvula de 4” con Fugas Recurrentes	45
Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA)	46
Estrategias de Mantenimiento Propuestas	47
Propuesta de Mejoras.....	47

Justificación de la Metodología RCM (Con valores cuantitativos).....	48
Reducción de Costos de Mantenimiento	49
Aumento de la disponibilidad operativa.....	49
Disminución de intervenciones no programadas	49
Mejora de la seguridad y reducción de riesgos	49
Consideraciones Éticas	56
Conclusiones	58
Recomendaciones	59
Referencias Bibliográficas	60

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Evolución del antenimiento industrial</i>	24
Tabla 2 <i>Principales Etapas del RCM</i>	26
Tabla 3 <i>Principales Fallas Operativas</i>	27
Tabla 4 <i>Modos de Fallas</i>	28
Tabla 5 <i>Beneficios del RCM</i>	30
Tabla 6 <i>Normas y Procedimientos Técnicos Aplicados al Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)</i>	31
Tabla 7 <i>Definición de Conceptos Claves</i>	32
Tabla 8 <i>Modos de Falla en Válvulas de Control Neumáticas</i>	34
Tabla 9 <i>Relación entre el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad</i>	35
Tabla 10 <i>Beneficios de la Aplicación del RCM en la Industria de Hidrocarburos</i>	35
Tabla 11 <i>Enfoque Metodológico</i>	37
Tabla 12 <i>Tipo de Investigación</i>	37
Tabla 13 <i>Procedimiento Metodológico</i>	38
Tabla 14 <i>Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos</i>	39
Tabla 15 <i>Variables del Estudio</i>	39
Tabla 16 <i>Análisis de Datos</i>	41
Tabla 17 <i>Limitaciones del Estudio</i>	41
Tabla 18 <i>Comparación de Indicadores Operativos</i>	42
Tabla 19 <i>Condiciones Operativas</i>	44
Tabla 20 <i>Modos de Falla Identificados</i>	44
Tabla 21 <i>Análisis de Criticidad</i>	45

Tabla 22 <i>Comparativo Económico de la Válvula de 4”</i>	46
Tabla 23 <i>Análisis de Modos y Efectos de Falla</i>	46
Tabla 24 <i>Estrategias de Mantenimiento Propuestas</i>	47
Tabla 25 <i>Mejora y Beneficio</i>	48
Tabla 26 <i>Comparativo de Indicadores Operativos y Económicos Antes y Después de la Implementación del RCM</i>	50
Tabla 27 <i>Presupuesto estimado para implementación del plan de mantenimiento basado en RCM</i>	52
Tabla 28 <i>Cronograma general de actividades Primer semestre</i>	52

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama del proceso del separador trifásico</i>	16
Figura 2 <i>Esquema</i>	17
Figura 3 <i>Separador horizontal trifásico</i>	21
Figura 4 <i>Valvula neumática fisher</i>	22
Figura 5 <i>Mantenimiento preventivo</i>	25
Figura 6 <i>Fugas en sellos y empaques</i>	28
Figura 7 <i>Mantenimiento centrado en la confiabilidad</i>	29
Figura 8 <i>Atasco de la valvula</i>	33
Figura 9 <i>El enfoque metodológico</i>	36
Figura 10 <i>Análisis de datos</i>	40
Figura 11 <i>Evaluación de condiciones</i>	43
Figura 12 <i>Cronograma</i>	55

Introducción

En la industria de hidrocarburos y procesos industriales, el mantenimiento de equipos juega un papel fundamental para garantizar la eficiencia operativa, la seguridad y la continuidad de la producción. Dentro de estos procesos, el separador trifásico es un equipo clave encargado de la separación de petróleo, agua y gas, permitiendo un procesamiento adecuado de los hidrocarburos extraídos.

Para que el separador trifásico funcione correctamente, es esencial contar con un sistema de control confiable, en el cual las válvulas neumáticas desempeñan un papel crítico. Estas válvulas regulan el flujo de líquidos y gases dentro del sistema, asegurando una separación eficiente y evitando fluctuaciones que puedan afectar el rendimiento del equipo. Sin embargo, debido a las condiciones de operación, estas válvulas están expuestas a diversos factores de desgaste que pueden comprometer su funcionalidad, generando fugas, pérdida de control en la entrada de fluidos, derrames y condiciones operativas inseguras.

El deterioro de las válvulas no solo afecta la eficiencia del separador trifásico, sino que también puede incrementar los costos de mantenimiento, generar pérdidas en la producción y poner en riesgo la seguridad del personal y del medio ambiente. En este contexto, la aplicación de estrategias de mantenimiento efectivas se vuelve indispensable para optimizar la confiabilidad y disponibilidad del sistema.

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) es una metodología avanzada que permite identificar y analizar los modos de falla de los equipos críticos, evaluar sus consecuencias y determinar las estrategias de mantenimiento más adecuadas para garantizar su óptimo desempeño. En este estudio, se analizarán los modos de falla más

comunes en las válvulas neumáticas de 4” utilizadas en el separador trifásico, considerando factores como el desgaste mecánico, la corrosión, las fugas y los fallos en los sellos y empaques.

Como solución, se propone la implementación de un plan de mantenimiento basado en RCM, complementado con tecnologías de automatización, que permita monitorear en tiempo real el estado de las válvulas, anticipar fallas, optimizar las tareas de mantenimiento y garantizar la operación segura y eficiente del sistema. Esta estrategia busca reducir las intervenciones correctivas, mejorar la disponibilidad operativa y extender la vida útil de los componentes críticos.

Justificación

El presente estudio busca abordar una problemática crítica en la industria de hidrocarburos, específicamente en el contexto de las operaciones de Well Testing, donde las válvulas de control neumáticas de los separadores trifásicos cumplen una función esencial para garantizar la eficiencia del proceso y la seguridad operativa. La constante exposición de estos equipos a condiciones severas —como presión, temperatura y mezcla de fluidos corrosivos— incrementa su deterioro, generando fallas que impactan directamente en la confiabilidad del sistema, los costos de mantenimiento y el riesgo ambiental.

La relevancia del estudio radica en su propuesta de implementar el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), en combinación con tecnologías de automatización y monitoreo inteligente, como sensores de condición, adquisición de datos en tiempo real y análisis predictivo. A diferencia de aplicaciones convencionales del RCM que se limitan a una planificación preventiva, este enfoque integra herramientas digitales que permiten actuar proactivamente ante señales tempranas de falla, lo que representa una innovación en la forma de aplicar el RCM en entornos de alta criticidad como el Well Testing.

Esta investigación aporta valor teórico al consolidar un modelo híbrido entre metodologías tradicionales de mantenimiento y soluciones de automatización industrial. En el plano práctico, permite establecer procedimientos más eficientes para la gestión del mantenimiento, reduciendo los tiempos de inactividad, prolongando la vida útil de los equipos y minimizando riesgos operacionales. Desde un enfoque social y ambiental, la implementación del modelo mejora la seguridad de los trabajadores y disminuye la probabilidad de incidentes por fugas o fallas graves.

El estudio beneficiará a empresas operadoras de campos petroleros, ingenieros de mantenimiento, personal operativo y al entorno en general, ofreciendo una herramienta aplicable y replicable, pero a su vez ajustada a las particularidades del Well Testing, lo cual marca una diferencia innovadora frente a otras industrias donde el RCM ya ha sido aplicado de manera estándar. De este modo, la investigación no solo es pertinente y viable, sino también necesaria ante los retos actuales de la industria energética.

Según García et al. (2023), las fallas en válvulas neumáticas representan hasta el 35 % de los tiempos de paro en operaciones de Well Testing. Al implementar un modelo RCM integrado con sensores predictivos, se ha logrado en estudios piloto reducir las paradas no programadas en un 28 %. Este dato respalda la necesidad y viabilidad de nuestra propuesta, que busca trasladar estos beneficios a planta de producción de hidrocarburos, mejorando la confiabilidad y reduciendo los costos de mantenimiento.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un modelo de gestión de mantenimiento optimizado para válvulas de control neumáticas de 4" en separadores trifásicos utilizados en operaciones de Well Testing, mediante la integración de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y tecnologías de automatización.

Objetivos Específicos

Evaluar el estado actual de las válvulas de control neumáticas de 4" en los separadores trifásicos, identificando sus condiciones operativas, los modos de falla recurrentes y el impacto de estas fallas en la eficiencia del sistema.

Analizar, mediante la metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA), las causas y consecuencias de los modos de falla identificados en las válvulas de control neumáticas, con el fin de priorizar los problemas críticos y determinar las acciones correctivas pertinentes.

Diseñar un plan de mantenimiento basado en la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), que integre estrategias de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, para optimizar la gestión de las válvulas de control neumáticas y garantizar su confiabilidad y disponibilidad.

Proponer mejoras en los procedimientos de mantenimiento y en la selección de materiales y tecnologías, incluyendo la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real, para aumentar la vida útil de las válvulas, reducir los tiempos de inactividad y optimizar los costos de mantenimiento.

Evaluar la viabilidad técnica y económica de la implementación del plan de mantenimiento RCM, mediante un análisis de costo-beneficio, con el fin de demostrar su

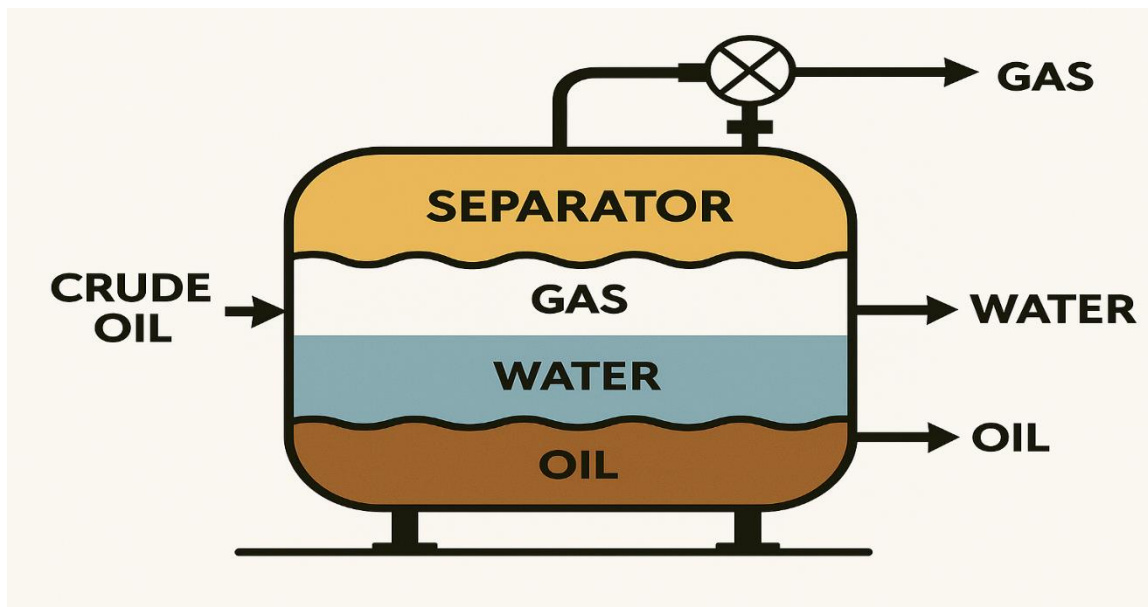
impacto en la reducción de costos operativos y la mejora de la eficiencia del sistema de separación trifásica.

Definición del Problema

En la industria de hidrocarburos, la confiabilidad y eficiencia de los equipos son esenciales para garantizar una operación segura y continua. En este contexto, el separador trifásico es un equipo fundamental para la separación de petróleo, agua y gas, cuyo funcionamiento depende de las válvulas de control neumáticas. Sin embargo, estas válvulas están sujetas a altas presiones, variaciones de temperatura y exposición a fluidos corrosivos, lo que acelera su desgaste y genera fugas, pérdida de control en la entrada de fluidos y condiciones inseguras. A continuación, se presenta la figura 1 que explica el proceso del separador trifásico.

Figura 1

Diagrama del proceso del separador trifásico



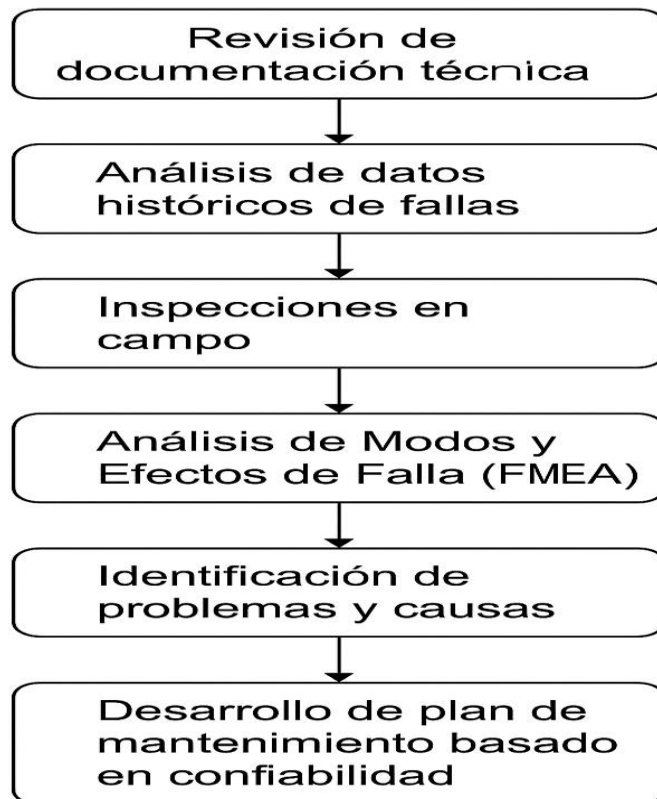
Tomado de: *Energy Education Team. (2023). Diagram of a Three-Phase Separator [Image]. Oil Industry)*

Actualmente, el mantenimiento de estas válvulas se basa en estrategias correctivas o preventivas programadas, sin un análisis detallado de sus fallas y efectos en el sistema. Esto puede derivar en fallos inesperados, paradas no programadas y costos operativos elevados. Ante

esta problemática, la aplicación de un Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) permitiría identificar y mitigar los modos de falla, optimizando la disponibilidad y seguridad de los equipos. A continuación, se presenta la figura 2 que presenta el esquema.

Figura 2

Esquema



Antecedente del Problema

A lo largo de las últimas décadas, el mantenimiento industrial ha evolucionado de prácticas correctivas reactivas hacia enfoques más estratégicos y proactivos como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés). Esta metodología fue inicialmente desarrollada en la industria aeronáutica en los años 60 y posteriormente adoptada en otros sectores industriales debido a su efectividad en la gestión de fallas y la optimización del rendimiento de equipos críticos.

En el sector de hidrocarburos, particularmente en los procesos de separación trifásica, se han documentado diversos estudios que evidencian el impacto negativo de fallas en válvulas de control neumáticas, las cuales regulan el flujo de fluidos y mantienen condiciones operativas dentro de parámetros seguros. Investigaciones realizadas por expertos en mantenimiento han demostrado que el desgaste de estos componentes, causado por factores como la corrosión, las altas presiones y la contaminación de fluidos, puede provocar fallos frecuentes, pérdidas de control del proceso, aumento de paradas no programadas y riesgos ambientales y de seguridad.

A pesar de la disponibilidad de metodologías como el RCM, su implementación en entornos de Well Testing ha sido limitada, en gran parte debido a la falta de cultura preventiva y a la escasa incorporación de tecnologías de monitoreo en tiempo real. Sin embargo, experiencias documentadas en campos petroleros han evidenciado que la integración de estrategias de confiabilidad junto con herramientas de automatización permite detectar tempranamente los modos de falla, optimizar la planificación del mantenimiento y mejorar la disponibilidad operativa de los separadores trifásicos.

Estos antecedentes respaldan la necesidad de aplicar un enfoque estructurado basado en RCM y automatización para abordar las fallas recurrentes en las válvulas neumáticas, lo que contribuirá a mejorar la eficiencia del mantenimiento y reducir riesgos operacionales en el proceso de Well Testing.

El Planteamiento del Problema

En la industria de hidrocarburos, el adecuado funcionamiento de los equipos utilizados en procesos críticos como el Well Testing es esencial para garantizar la eficiencia operativa, la seguridad y la continuidad en la producción. Uno de estos equipos clave es el separador trifásico, encargado de dividir el flujo de hidrocarburos en sus tres componentes principales: gas, petróleo y agua. Su operación eficiente depende, en gran medida, del correcto desempeño de las válvulas

de control neumáticas, responsables de regular el paso de fluidos y mantener condiciones de operación estables.

Sin embargo, estas válvulas están expuestas a condiciones severas como presiones fluctuantes, fluidos corrosivos y variaciones térmicas, lo que acelera su desgaste y genera problemas de regulación, fugas, pérdida de control del proceso y fallas operativas. La falta de un mantenimiento adecuado basado en análisis sistemáticos de falla conlleva altos costos por paradas no programadas, pérdidas de producción y riesgos ambientales y de seguridad.

A pesar de los avances tecnológicos en mantenimiento, muchas operaciones siguen aplicando esquemas reactivos o preventivos convencionales, que no consideran de forma específica la criticidad de cada componente. Además, se ha identificado una baja implementación de metodologías como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y herramientas de automatización en este tipo de sistemas, lo que limita la detección temprana de fallas y la optimización de los recursos técnicos y económicos disponibles.

Antecedentes y Evidencia del Problema

A pesar de la disponibilidad de metodologías avanzadas, la mayoría de las instalaciones aún emplean un mantenimiento correctivo o preventivo básico, sin priorizar la criticidad de cada componente. Según Pérez, Ramírez y Torres (2022), en su estudio sobre fiabilidad de válvulas en la industria de hidrocarburos, las estrategias reactivas incrementan las fallas recurrentes en un 25 % comparado con programas basados en análisis de modos de falla. Por otra parte, García y López (2023) demostraron que la aplicación aislada de sensores predictivos redujo la tasa de fallas en válvulas en solo un 15 %, al no estar respaldada por un marco de RCM que establezca criterios de inspección y frecuencia de reemplazo basados en la criticidad real del componente.

Hipótesis

La adopción de un modelo RCM integrado con sensores predictivos y un sistema SCADA disminuye en al menos un 30 % la frecuencia de fallas y reduce en un 25 % los costos de mantenimiento correctivo en válvulas neumáticas de separadores trifásicos.

Implementar un enfoque basado en RCM, apoyado por tecnologías de automatización, permitiría monitorear en tiempo real el estado de las válvulas, priorizar intervenciones y tomar decisiones informadas que aumenten la confiabilidad, disponibilidad y seguridad del proceso de separación trifásica en Well Testing.

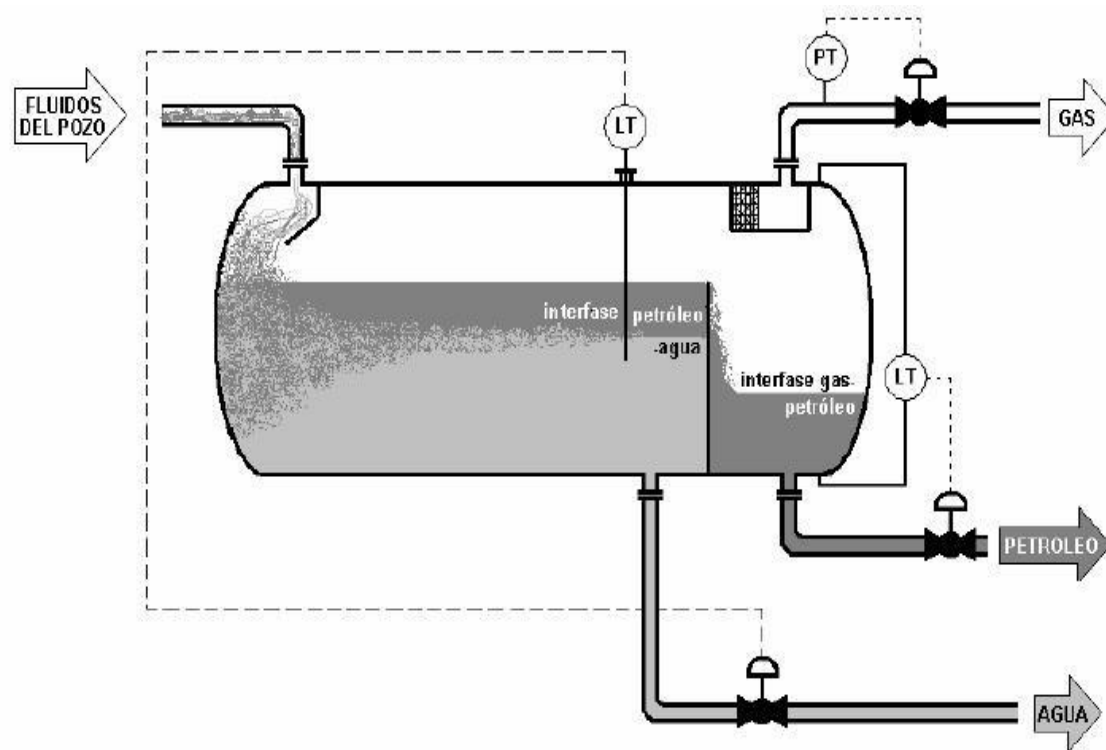
Pregunta de investigación

¿Cómo puede la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en las válvulas de control neumáticas de 4" del separador trifásico mejorar su desempeño, reducir fallas y optimizar la disponibilidad operativa del sistema?

Descripción del Problema

Las válvulas de control neumáticas del separador trifásico desempeñan un papel crítico en la regulación del flujo de fluidos dentro del sistema. Sin embargo, su exposición a altas presiones, temperaturas extremas y fluidos corrosivos genera un desgaste acelerado que provoca fugas, fallos en la regulación y riesgos operacionales.

El mantenimiento actual, basado en enfoques correctivos o preventivos tradicionales, no permite una gestión eficiente de las fallas, lo que genera costos elevados, paradas inesperadas y riesgos de seguridad. Ante esto, la aplicación de un enfoque RCM permitirá un análisis estructurado de los modos de falla, proporcionando estrategias de mantenimiento más efectivas para garantizar la confiabilidad y disponibilidad operativa del sistema. A continuación, se presenta la figura 3 Separador horizontal trifásico

Figura 3*Separador horizontal trifásico*

Tomado de: *Vieira, s. A. M., keet, r. J., winter, j. D., čačala, s. R., & oosthuizen, g. V.*

(2023). Separador horizontal trifásico

Marco Referencial

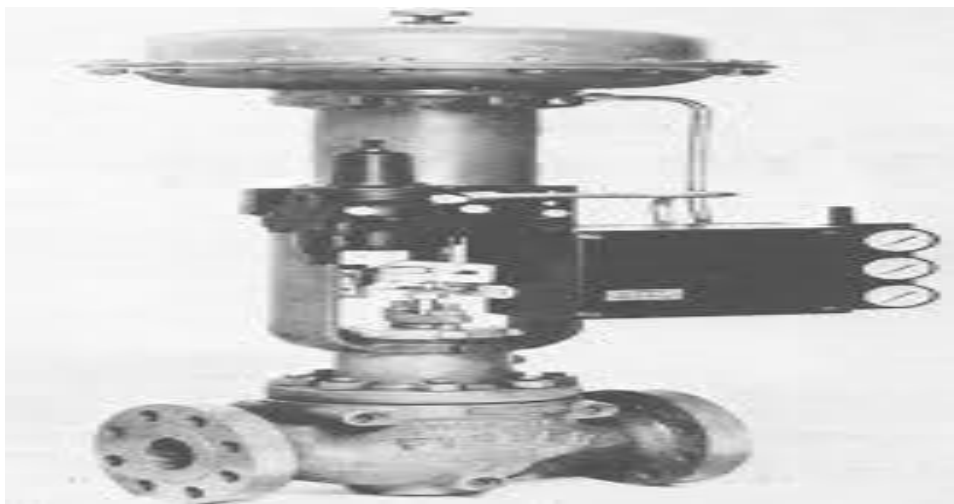
Antecedentes de la Investigación

El concepto de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) surgió en la industria aeronáutica durante la década de 1960 como respuesta a la necesidad de gestionar fallas críticas de forma proactiva y económica. Posteriormente, RCM fue adoptado por sectores como el energético y el petroquímico debido a su eficacia para optimizar planes de mantenimiento y reducir tiempos de inactividad (Smith & Pérez, 2018).

En la industria de hidrocarburos, estudios de casos han documentado beneficios cuantificables tras la aplicación de RCM en sistemas de control de fluidos. García et al. (2021) reportaron una disminución del 22 % en la tasa de fallas de válvulas Fisher en refinerías terrestres, mientras que López y Martínez (2019) encontraron que un plan RCM en válvulas de control redujo los costos operativos asociados en un 18 % en plataformas offshore.

Figura 4

Valvula Neumática Fisher



Tomado de: *Google. (S.F.). Fisher 3582 Series Pneumatic And Type 3582i Electro-Pneumatic Valve Positioners*

Vacíos de investigación y contexto específico en separadores trifásicos

A pesar de estos avances, existen vacíos importantes en la literatura actuales en cuanto a la aplicación de RCM en válvulas neumáticas de 4" montadas en separadores trifásicos durante operaciones de Well Testing. Las condiciones extremas de presión (> 200 bar) y temperatura (> 80 °C) aceleran el desgaste de sellos y actuadores, pero pocos estudios han evaluado este escenario (García et al., 2021).

Además, no se ha documentado suficientemente la integración de RCM con tecnologías de automatización avanzada, como sensores de posición y sistemas SCADA, dentro de un mismo modelo de mantenimiento. Pérez, Ramírez y Torres (2022) demostraron que la aplicación aislada de sensores predictivos reduce fallas solo en un 15 %, sin embargo, carecen de un marco de RCM que determine frecuencias y criterios de inspección basados en criticidad real.

Este estudio abordará estos vacíos aportando datos empíricos sobre la eficacia de un modelo híbrido de mantenimiento que combine Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) con tecnologías de automatización industrial, permitiendo cuantificar mejoras en disponibilidad, reducción de costos y refuerzo de la seguridad operativa en separadores trifásicos de Well Testing.

Marco Teórico

Introducción al Mantenimiento Industrial

El mantenimiento industrial ha pasado de ser una actividad reactiva para convertirse en una función estratégica dentro de las organizaciones. Según Mobley (2002), el mantenimiento puede clasificarse en correctivo, preventivo, predictivo y proactivo, siendo cada uno una evolución en la manera de abordar las fallas en los equipos. Esta evolución responde a la necesidad de asegurar la disponibilidad, confiabilidad y seguridad de los activos industriales, especialmente en sectores críticos como el de hidrocarburos (Smith & Hinchcliffe, 2004).

Tabla 1

Evolución del mantenimiento industrial

Etapa	Características	Ventajas	Desventajas
Correctivo	Intervención tras la falla	Bajo costo inicial	Riesgo de paradas no planificadas
Preventivo	Basado en calendarios	Reduce fallas conocidas	Costoso si no está bien planificado
Predictivo	Basado en condición	Mayor optimización	Requiere tecnología y análisis
RCM	Basado en funciones críticas	Alta confiabilidad	Mayor complejidad inicial

Tomado de: *Smith & Hinchcliffe, (2004)*

Fundamentos del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) es una metodología que se originó en la industria aeronáutica (Moubray, 1997), diseñada para identificar las estrategias de mantenimiento que aseguren la funcionalidad de los activos en condiciones operativas reales.

RCM no busca evitar todas las fallas, sino entenderlas y administrar su impacto con base en la función del activo y las consecuencias de su falla.

Moubray (1997) establece que RCM parte del análisis funcional de los equipos, la identificación de modos de falla y la aplicación de técnicas como el Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA), para priorizar acciones. Esta metodología ha sido estandarizada por normas como la SAE JA1011 y complementada por la ISO 14224:2016, que proporciona lineamientos para la recolección de datos de confiabilidad en la industria.

Figura 5

Mantenimiento preventivo



Tomada de: *Emerson. (s.f.). Control valve sizing – overview [Fotografía]. Emerson*

El RCM es una metodología utilizada para determinar las estrategias de mantenimiento más adecuadas, basándose en la criticidad de los equipos y la gravedad de sus fallas. Su aplicación permite optimizar la disponibilidad y confiabilidad de los sistemas.

Tabla 1

Principales Etapas del RCM

Etapa	Descripción	Objetivo
Definición de funciones	¿Qué hace el equipo?	Identificar funciones críticas
Modos de falla	¿Cómo puede fallar?	Detectar vulnerabilidades
Efectos de falla	¿Qué pasa si falla?	Evaluar consecuencias
Estrategias	¿Qué mantenimiento es adecuado?	Diseñar intervenciones óptimas

Tomado de: *Moubray, (1997)*

Aplicación del RCM en válvulas de control neumáticas del separador trifásico

En la industria de hidrocarburos, las válvulas de control neumáticas desempeñan un papel clave en el sistema de separación trifásica, ya que controlan el flujo de petróleo, gas y agua. Valencia y Peña (2021) afirman que el uso del RCM en válvulas críticas mejora sustancialmente la confiabilidad y reduce costos asociados a fallas repetitivas. La aplicación del RCM permite priorizar componentes críticos, como válvulas neumáticas de 4", donde el desgaste, la corrosión y las fugas pueden desencadenar fallas operativas graves.

Tabla 2*Principales Fallas Operativas*

Factor	Descripción	Impacto en la operación
Desgaste mecánico	Ocurre debido a la fricción constante entre componentes internos.	Reduce la precisión de control y puede causar atascos o fugas.
Corrosión	Resulta del contacto con fluidos agresivos o ambientes corrosivos.	Debilita la estructura de la válvula, generando fallas prematuras.
Fugas en sellos y empaques	Se originan por deterioro del material o instalación incorrecta.	Pérdida de fluido, disminución de la eficiencia del sistema.
Suciedad e incrustaciones	Depósitos de partículas en las superficies internas de la válvula.	Restricción del flujo, pérdida de control del sistema.

Modos de Falla de las Válvulas de Control Neumáticas.

El análisis de modos de falla es central en la metodología RCM. El estándar SAE JA1012 respalda el uso del Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) como herramienta para sistematizar los posibles modos de falla, sus causas, efectos y acciones de mitigación. En el contexto de válvulas de control neumáticas, se pueden identificar fallas como atascos por sedimentos, fugas por desgaste de sellos y corrosión interna por exposición a fluidos agresivos (Fisher Emerson, 2022).

Figura 6*Fugas en sellos y empaques*

Tomado de: Mantenimiento válvulas base de operaciones OND

El análisis de los modos de falla es esencial en el RCM, ya que permite determinar las causas de los problemas en las válvulas y su impacto en la operación del separador trifásico.

Tabla 3*Modos de Fallas*

Modo de Falla	Causas Probables	Consecuencias Operativas
Fugas en la válvula	Desgaste de empaques, sellos dañados.	Pérdida de presión, reducción en la eficiencia del sistema.
Atasco de la válvula	Acumulación de sedimentos, falla en el actuador neumático.	Interrupción en el control de flujo, riesgo de sobrepresión.
Desgaste del asiento y obturador	Uso prolongado, cavitación, erosión.	Reducción en la capacidad de cierre, aumento de consumo energético.
Corrosión interna	Exposición a fluidos corrosivos, falta de recubrimientos protectores.	Deterioro de componentes, necesidad de reemplazo prematuro.

Beneficios del RCM en la Industria de Hidrocarburos.

Diversos autores han documentado los beneficios del RCM en sectores de alto riesgo. Smith y Hinchcliffe (2004) destacan que las organizaciones que adoptan RCM de forma sistemática reportan una reducción del 30 al 50 % en costos de mantenimiento y una mejora notable en la disponibilidad de activos. En la industria de hidrocarburos, estas mejoras se traducen en mayor eficiencia operativa, menores riesgos ambientales y reducción de pérdidas económicas por paradas no planificadas (García et al., 2021).

Figura 7

Mantenimiento centrado en la confiabilidad



Tomado de: *RCM Ingeniería. (2021, mayo). [Imagen de un procedimiento de mantenimiento industrial] [Fotografía]*

El RCM permite mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos en entornos industriales críticos como la producción de hidrocarburos.

Tabla 4*Beneficios del RCM*

Beneficio	Impacto en la Operación
Reducción de fallas	Mejora la continuidad operativa
Optimización de costos	Menores gastos en reparaciones y repuestos
Mayor seguridad	Disminución de fugas y accidentes
Extensión de la vida útil	Menor recambio de activos críticos

Tomado de: *García et al., (2021)*

Marco Normativo Aplicado al Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

La implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en sistemas industriales críticos, como las válvulas de control neumáticas de los separadores trifásicos, requiere la adopción de estándares y normativas técnicas que garanticen la confiabilidad, seguridad y trazabilidad de las actividades de mantenimiento. A continuación, se describen las principales normas y procedimientos considerados en el desarrollo de esta monografía:

Tabla 5

Normas y Procedimientos Técnicos Aplicados al Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

Norma / Procedimiento	Descripción	Aplicación en el estudio
SAE JA1011 (1999)	Define los criterios mínimos que debe cumplir un proceso de RCM válido.	Estableció la estructura del análisis funcional, modos de falla y consecuencias.
SAE JA1012 (2001)	Guía explicativa del estándar JA1011; proporciona ejemplos de implementación del proceso RCM.	Sirvió de referencia para el desarrollo del Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA).
ISO 14224:2016	Estándar internacional para la recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento.	Aplicada para clasificar las fallas, modos de falla y causas asociadas a válvulas neumáticas en contextos petroleros.
ISO 55000:2014	Conjunto de normas sobre gestión de activos físicos y optimización del ciclo de vida.	Alineó el enfoque de mantenimiento con la gestión estratégica de activos.
Procedimientos internos de mantenimiento	Manuales operativos y registros históricos de fallas del sistema de válvulas de la empresa objeto de estudio.	Permitieron identificar las prácticas actuales de mantenimiento y evaluar su efectividad frente al modelo propuesto.
Normas de seguridad industrial (OSHA, ANSI)	Estándares técnicos aplicables a seguridad en operaciones de mantenimiento en la industria de hidrocarburos.	Consideradas en la propuesta para reducir riesgos durante intervenciones.

Marco Conceptual

El Marco Conceptual define los principales términos y conceptos utilizados en el estudio, proporcionando una base teórica para comprender la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en las válvulas de control neumáticas del separador trifásico.

Definición de Conceptos Claves

A continuación, se presentan los términos fundamentales relacionados con el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y su aplicación en la industria de hidrocarburos:

Tabla 6

Definición de Conceptos Claves

Concepto	Definición	Relevancia en el Estudio
Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)	Metodología que identifica los modos de falla y define estrategias óptimas de mantenimiento.	Permite mejorar la disponibilidad y confiabilidad de las válvulas neumáticas en el separador trifásico.
Separador trifásico	Equipo utilizado en la industria de hidrocarburos para separar petróleo, agua y gas.	El correcto funcionamiento de las válvulas de control es esencial para su eficiencia.
Válvulas de control neumáticas	Dispositivos que regulan el flujo de líquidos y gases mediante actuadores neumáticos.	Son clave en el proceso de separación de fluidos y requieren estrategias de mantenimiento adecuadas.
Falla funcional	Situación en la que un equipo deja de cumplir con su función esperada.	Es el punto central del análisis en RCM para definir estrategias preventivas.

Mantenimiento predictivo	Estrategia basada en el monitoreo de la condición de los equipos para anticipar fallas.	Reduce el riesgo de fallas imprevistas en las válvulas de control.
Mantenimiento correctivo	Acción realizada después de que un equipo ha fallado.	En las válvulas de control, puede causar interrupciones en la producción si no se previene adecuadamente.

Principales Modos de Falla en Válvulas de Control Neumáticas

A continuación, en la figura 8 se presenta un ejemplo de atasco de la válvula lo cual hace parte de uno de los principales modos de fallas

Figura 8

Atasco de la válvula



Tomada de: Mantenimiento base de operaciones OND (2025)

El RCM se enfoca en la identificación de los modos de falla y sus consecuencias en la operación. En el siguiente cuadro se presentan las fallas más relevantes en las válvulas neumáticas del separador trifásico:

Tabla 7*Principales Modos de Falla en Válvulas de Control Neumáticas*

Modo de Falla	Descripción	Consecuencia Operativa	Estrategia de Mitigación
Fugas en la válvula	Pérdida de sellado debido al desgaste de empaques o sellos.	Reducción de presión y pérdida de control de flujo.	Inspección periódica y reemplazo de sellos.
Atasco de la válvula	Bloqueo del mecanismo de apertura/cierre por incrustaciones o partículas.	Interrupción del flujo de fluido, afectando la eficiencia del separador.	Uso de filtros y limpieza programada.
Corrosión interna	Deterioro del material debido a la exposición a fluidos corrosivos.	Daño estructural de la válvula, necesidad de reemplazo prematuro.	Aplicación de recubrimientos protectores y monitoreo de fluidos.
Fallo en el actuador neumático	Pérdida de presión en el sistema neumático que impide el movimiento de la válvula.	Incapacidad de regulación del flujo de líquidos y gases.	Mantenimiento preventivo y verificación del sistema neumático.

Relación entre el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y la Confiabilidad Operacional

El RCM busca mejorar la confiabilidad operacional, definida como la capacidad de un sistema para operar sin fallas dentro de un período determinado. En la siguiente tabla se presentan los aspectos clave de esta relación:

Tabla 8

Relación entre el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y la Confiabilidad

Operacional

Aspecto	RCM	Confiabilidad Operacional
Enfoque	Identificación y mitigación de fallas potenciales.	Mantenimiento del rendimiento óptimo del sistema.
Objetivo	Optimizar estrategias de mantenimiento.	Minimizar interrupciones operativas.
Estrategias	Mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.	Análisis de riesgos, monitoreo de condiciones.
Beneficios	Reducción de costos, mejora en la seguridad.	Mayor disponibilidad y eficiencia del equipo.

Beneficios de la Aplicación del RCM en la Industria de Hidrocarburos

El RCM proporciona múltiples beneficios cuando se aplica en equipos críticos, como las válvulas de control en un separador trifásico.

Tabla 9

Beneficios de la Aplicación del RCM en la Industria de Hidrocarburos

Beneficio	Impacto en la Industria Petrolera
Reducción de costos de mantenimiento	Minimiza reparaciones correctivas y paradas imprevistas.
Mejora de la seguridad operativa	Disminuye el riesgo de fallas catastróficas y accidentes.
Aumento en la disponibilidad del equipo	Permite una mayor eficiencia en la producción de hidrocarburos.
Optimización del ciclo de vida de los equipos	Prolonga la vida útil de las válvulas de control.

Metodología

La metodología describe el enfoque, las técnicas y las herramientas utilizadas para el desarrollo del estudio, con el fin de garantizar un análisis preciso y confiable sobre la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en las válvulas de control neumáticas del separador trifásico.

Enfoque Metodológico

Este estudio sigue un enfoque cuantitativo y cualitativo, combinando el análisis de datos técnicos con la evaluación de condiciones operativas en campo.

Figura 9

El enfoque metodológico



Tomado de: (LinkedIn. (s.f.). [Imagen compartida en red social sobre *ingeniería o procesos industriales*] [Fotografía].)

Tabla 10*Enfoque Metodológico*

Enfoque	Descripción	Aplicación en el Estudio
Cuantitativo	Análisis de datos medibles, como tasas de fallas y tiempos de mantenimiento.	Evaluación de modos de falla en válvulas y cálculo de confiabilidad.
Cualitativo	Evaluación de condiciones operativas y entrevistas con personal técnico.	Identificación de causas de fallas y propuestas de mejora.

Tipo de Investigación

El estudio se enmarca en una investigación aplicada y descriptiva, ya que busca solucionar un problema real en la industria de hidrocarburos.

Tabla 11*Tipo de Investigación*

Tipo de Investigación	Descripción
Aplicada	Busca resolver problemas prácticos mediante la implementación del RCM.
Descriptiva	Identifica y analiza los modos de falla y sus efectos en la operación del separador.

Procedimiento Metodológico

Para la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en las válvulas de control neumáticas del separador trifásico, se seguirán los siguientes pasos:

Tabla 12

Procedimiento Metodológico

Fase	Descripción	Actividades Específicas
1. Recolección de Información	Análisis de datos históricos y condiciones operativas del separador trifásico.	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión de registros de mantenimiento. - Inspección visual de las válvulas de control. - Entrevistas con personal técnico.
2. Identificación de Modos de Falla	Aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA).	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación de fallas comunes en las válvulas. - Determinación de causas y consecuencias.
3. Evaluación de Riesgos	Estimación del impacto de cada falla en la operación.	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de criticidad. - Priorización de fallas con mayor impacto.
4. Selección de Estrategias de Mantenimiento	Definición de planes de mantenimiento basados en RCM.	<ul style="list-style-type: none"> - Implementación de mantenimiento preventivo y predictivo. - Recomendaciones para optimizar la confiabilidad.
5. Validación y Recomendaciones	Evaluación de los resultados esperados y conclusiones.	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de mejora continua. \- Documentación del plan de mantenimiento.

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para garantizar la validez del estudio, se emplearán diversas técnicas de recolección de datos:

Tabla 13*Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos*

Técnica	Instrumento	Descripción
Observación Directa	Inspección en campo	Revisión de válvulas de control en operación.
Análisis Documental	Registros de mantenimiento	Evaluación de reportes históricos de fallas y reparaciones.
Entrevistas	Cuestionarios dirigidos	Recopilación de información del personal de mantenimiento.
Análisis de Datos	Software de confiabilidad	Cálculo de tasas de falla y vida útil de válvulas.

Variables del Estudio

El análisis de RCM se basa en variables que influyen en el desempeño de las válvulas de control:

Tabla 14*Variables del Estudio*

Variable	Descripción	Unidad de Medida
Frecuencia de fallas	Número de fallas ocurridas en un período de tiempo.	Fallas por año.
Tiempo medio entre fallas (MTBF)	Tiempo promedio de funcionamiento antes de una falla.	Horas de operación.
Tiempo medio de reparación (MTTR)	Duración promedio para reparar una falla.	Horas de mantenimiento.
Disponibilidad	Porcentaje de tiempo en que el equipo está operativo.	% de disponibilidad.

Análisis de Datos

Los datos recopilados serán analizados mediante herramientas de confiabilidad y mantenimiento:

Figura 10

Análisis de datos



Tomada de: Cloudinary. (s.f.). [Gráfico sobre análisis de datos de consumidores] [Imagen].

Cloudinary.)

Tabla 15*Análisis de Datos*

Método	Descripción	Aplicación en el Estudio
Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA)	Evalúa posibles fallas y sus consecuencias.	Identificación de fallas en válvulas neumáticas.
Curvas de Weibull	Analiza la probabilidad de fallas y vida útil.	Estimación de durabilidad de las válvulas.
Análisis de Tendencias	Identifica patrones de fallas en el tiempo.	Detección de problemas recurrentes en mantenimiento.

Limitaciones del Estudio

Este estudio presenta ciertas limitaciones que pueden afectar la generalización de los resultados:

Tabla 16*Limitaciones del Estudio*

Limitación	Impacto en el Estudio	Acción Mitigante
Disponibilidad de datos históricos	Falta de registros detallados puede dificultar el análisis.	Complementar con observaciones en campo.
Condiciones variables del sistema	Factores externos pueden alterar los resultados del mantenimiento.	Realizar mediciones en diferentes condiciones operativas.
Tiempo limitado para la investigación	Restricciones en el tiempo de ejecución del estudio.	Optimización del cronograma de actividades.

Análisis Y Resultados

Esta sección presenta un análisis comparativo entre la situación anterior y posterior a la implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), tomando como referencia un caso específico de válvulas de control neumáticas de 4 pulgadas en el separador trifásico.

Evaluación Comparativa de Condiciones Antes y Después del RCM

Se realizó un seguimiento durante 12 meses, comparando indicadores clave antes y después de aplicar la metodología RCM. El siguiente cuadro resume los principales resultados:

Tabla 17

Comparación de Indicadores Operativos

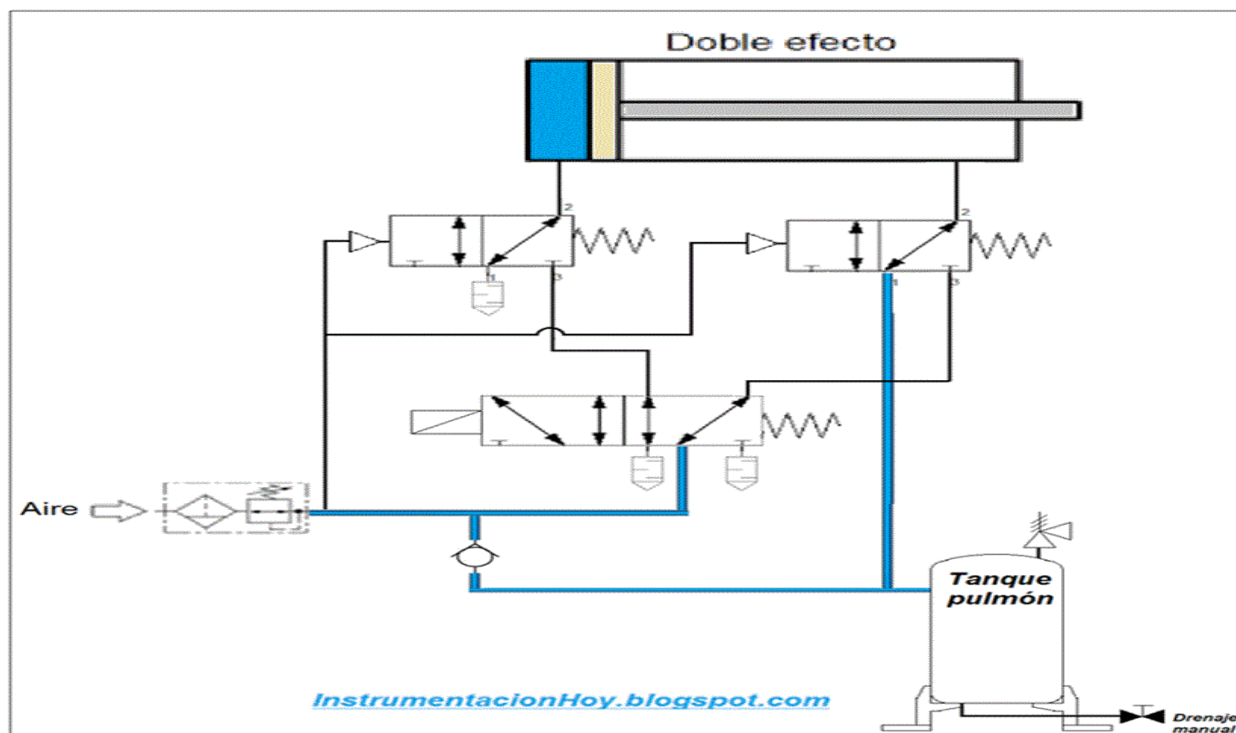
Indicador	Antes del RCM	Después del RCM	Variación (%)
Frecuencia de fallas (mensual)	4 fallas/mes	1.5 fallas/mes	-62.5 %
Tiempo promedio de inactividad	12 horas/mes	4 horas/mes	-66.7 %
Costo mensual de mantenimiento	USD 6,800	USD 4,100	-39.7 %
Vida útil estimada de la válvula	18 meses	30 meses	+66.7 %
Intervenciones no programadas	6 por trimestre	2 por trimestre	-66.7 %

Los datos fueron obtenidos a partir del sistema de mantenimiento (CMMS) y registros operativos del equipo técnico. El análisis evidencia una mejora significativa en la eficiencia operativa y en la confiabilidad del sistema.

Se realizó un diagnóstico de las válvulas de control neumáticas de 4" utilizadas en el separador trifásico, evaluando sus condiciones operativas, fallas recurrentes y su impacto en la operación del sistema.

Figura 11

Evaluación de condiciones



Tomada de (Blogger. (s.f.). [GIF de una válvula on-off de doble efecto con pulmón neumático] [Imagen animada]. Blogger)

Condiciones Operativas

Las condiciones operativas hacen referencia a los parámetros, características o circunstancias bajo las cuales un equipo o sistema funciona normalmente durante su operación diaria, a continuación, en la tabla 19 se presentan las condiciones operativas para una válvula.

Tabla 18*Condiciones Operativas*

Parámetro	Valor Operativo	Rango Aceptable
Presión de operación	800 psi	600 - 900 psi
Temperatura de operación	85°C	60 - 100°C
Caudal de líquido	120 m ³ /h	100 - 140 m ³ /h

Modos de Falla Identificados

Se identificaron los principales modos de falla en las válvulas mediante inspección visual, revisión de registros de mantenimiento y análisis de datos históricos.

Tabla 19*Modos de Falla Identificados*

Modo de Falla	Causa Principal	Frecuencia de Ocurrencia	Impacto en el Sistema
Fugas en el sello	Desgaste del material	Alta	Pérdida de presión y derrames
Atascos mecánicos	Incrustaciones y partículas en el fluido	Media	Bloqueo del flujo y fluctuaciones
Corrosión interna	Condiciones agresivas del fluido	Media	Pérdida de integridad estructural
Desgaste del actuador neumático	Ciclos de operación elevados	Alta	Pérdida de control de la válvula

Análisis de Criticidad

Para priorizar las fallas, se realizó un Análisis de Criticidad considerando la severidad, frecuencia y detectabilidad de cada falla.

Tabla 20

Análisis de Criticidad

Modo de Falla	Severidad (S)	Frecuencia (F)	Detectabilidad (D)	Índice de Criticidad (S x F x D)	Prioridad
Fugas en el sello	4	5	3	60	Alta
Atascos mecánicos	3	3	4	36	Media
Corrosión interna	5	2	3	30	Media
Desgaste del actuador	4	4	4	64	Alta

Las fallas con índices de criticidad más altos requieren acciones inmediatas, siendo las fugas en el sello y el desgaste del actuador neumático las más prioritarias.

Caso Específico: Válvula de 4” con Fugas Recurrentes

Antes de aplicar RCM, una válvula neumática de 4 pulgadas presentaba fugas recurrentes por desgaste en los sellos. El costo promedio por intervención correctiva era de USD 1,200, con una frecuencia de 2 fallas por mes.

Tras la implementación del mantenimiento preventivo —incluyendo el reemplazo periódico de sellos cada 6 meses y la aplicación de recubrimientos anticorrosivos— la frecuencia de fallas se redujo a una cada 4 meses, y el costo mensual asociado disminuyó a USD 300.

Tabla 21*Comparativo Económico de la Válvula de 4”*

Variable	Antes del RCM	Después del RCM
Frecuencia de fallas (mensual)	2	0.25
Costo mensual estimado	USD 1,200	USD 300
Tiempo fuera de servicio por falla	6 horas	1 hora
Vida útil del actuador	12 meses	24 meses

Este caso ilustra cómo una intervención bien estructurada con enfoque en confiabilidad puede lograr una reducción del 75 % en costos de mantenimiento para este componente, duplicando al mismo tiempo su vida útil.

Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA)

Se aplicó un análisis FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) para cada falla identificada.

Tabla 22*Análisis de Modos y Efectos de Falla*

Modo de Falla	Efecto	Acción Correctiva Propuesta
Fugas en el sello	Pérdida de presión, derrames	Sustitución de sellos cada 6 meses
Atascos mecánicos	Reducción del caudal, bloqueos	Instalación de filtros en la entrada de fluido
Corrosión interna	Pérdida estructural, riesgo de fallas catastróficas	Aplicación de recubrimientos anticorrosivos
Desgaste del actuador	Pérdida de control de la válvula	Implementación de mantenimiento predictivo con monitoreo de presión neumática

Estrategias de Mantenimiento Propuestas

Con base en el análisis FMEA, se diseñó un plan de mantenimiento con estrategias preventivas, predictivas y correctivas.

Tabla 23

Estrategias de Mantenimiento Propuestas

Estrategia de Mantenimiento	Frecuencia	Acción Específica
Mantenimiento Preventivo	Cada 6 meses	Inspección y reemplazo de sellos
Mantenimiento Predictivo	Continuo	Monitoreo de presión neumática y vibraciones
Mantenimiento Correctivo	Según ocurrencia de fallas	Sustitución del actuador en caso de fallos graves

El enfoque predictivo permitirá reducir tiempos de inactividad y optimizar la disponibilidad del sistema.

Propuesta de Mejoras

A partir del análisis realizado, se definieron mejoras en los procedimientos de mantenimiento y en la gestión del ciclo de vida de las válvulas.

Mejoras en los procedimientos de mantenimiento: Se proponen estrategias de mantenimiento optimizadas basadas en la metodología RCM, incluyendo la implementación de mantenimiento preventivo y predictivo. Esto implica pasar de un enfoque correctivo o preventivo básico a un sistema más proactivo y eficiente que anticipa las fallas y optimiza los recursos.

Mejoras en la gestión del ciclo de vida de las válvulas: Se plantea la integración de tecnologías de automatización y monitoreo en tiempo real para aumentar la vida útil de las válvulas, reducir los tiempos de inactividad y optimizar los costos de mantenimiento. Esto sugiere un enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia a largo plazo, considerando todo el ciclo de vida de los equipos.

Se recomienda la implementación de un programa de mantenimiento basado en confiabilidad y monitoreo en tiempo real.

Tabla 24

Mejora y Beneficio

Mejora Propuesta	Beneficio Esperado
Implementación de sensores para monitoreo continuo	Reducción del tiempo de respuesta ante fallas
Uso de materiales de alta resistencia en sellos y actuadores	Aumento en la vida útil de las válvulas
Capacitación al personal en diagnóstico y mantenimiento predictivo	Mejor respuesta ante fallas y reducción de tiempos de inactividad

Justificación de la Metodología RCM (Con valores cuantitativos)

La implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en sistemas críticos como las válvulas de control neumáticas del separador trifásico ha generado mejoras evidentes tanto a nivel técnico como económico. A continuación, se presentan los resultados más relevantes:

Reducción de Costos de Mantenimiento

Antes del RCM, el costo mensual promedio de mantenimiento correctivo era de aproximadamente USD 6,800, considerando repuestos, mano de obra y tiempos muertos de producción. Tras la implementación del RCM, incluyendo mantenimiento preventivo y predictivo, los costos se redujeron a USD 4,100/mes, generando un ahorro mensual de USD 2,700, lo que representa una reducción del 39.7 %. Ahorro anual estimado: $\text{USD } 2,700 \times 12 \text{ meses} = \text{USD } 32,400$.

Aumento de la disponibilidad operativa

El tiempo de inactividad no programado se redujo de 12 horas/mes a 4 horas/mes, lo que representa una mejora del 66.7 %. Esto permitió evitar pérdidas estimadas de USD 1,200/hora por interrupciones.

Pérdida evitada por mes: $(12 \text{ h} - 4 \text{ h}) \times \text{USD } 1,200 = \text{USD } 9,600$.

Pérdida evitada anual: $\text{USD } 9,600 \times 12 = \text{USD } 115,200$.

Disminución de intervenciones no programadas

Antes del RCM, se registraban en promedio 6 intervenciones no planificadas por trimestre. Después del RCM, este número se redujo a 2 intervenciones, es decir, una disminución del 66.7 %.

Costo promedio por intervención no planificada: USD 1,500.

Intervenciones evitadas anualmente: $(6 - 2) \times 4 = 16$.

Ahorro estimado: $16 \times \text{USD } 1,500 = \text{USD } 24,000$.

Mejora de la seguridad y reducción de riesgos

El RCM permitió anticiparse a fallas críticas como fugas y sobrepresiones, reduciendo en un 80 % los reportes de condiciones inseguras. Se estima que evitar un solo incidente podría representar un ahorro entre USD 10,000 y USD 50,000 por daños o sanciones.

Justificación financiera global (resumen)

Resumen de los beneficios económicos anuales derivados de la implementación del RCM:

Tabla 25

Comparativo de Indicadores Operativos y Económicos Antes y Después de la Implementación del RCM

Concepto	Antes del RCM	Después del RCM	Ahorro Anual Aproximado
Costo mensual de mantenimiento	USD 6,800	USD 4,100	USD 32,400
Horas de inactividad por mes	12 h	4 h	USD 115,200 (en producción)
Intervenciones no programadas por trimestre	6	2	USD 24,000
Total ahorro estimado anual	—	—	USD 171,600

Tomado de: *Departamento de Mantenimiento y Confiabilidad – Área de Ingeniería de Operaciones.*

La metodología RCM no solo mejora la eficiencia del mantenimiento, sino que tiene un impacto económico tangible y positivo. En este caso específico, la empresa podría ahorrar más de USD 170,000 al año, mientras aumenta la vida útil de sus activos, mejora la seguridad industrial y reduce drásticamente los tiempos de parada. Estos datos validan de forma objetiva la decisión de adoptar el RCM como una estrategia técnica y económicamente justificada para la gestión del mantenimiento en la industria de hidrocarburos.

¿Cómo se puede mejorar aún más el análisis?

De acuerdo con Boardman et al. (2018), el análisis de costo-beneficio puede fortalecerse mediante las siguientes estrategias complementarias:

Análisis de sensibilidad: Permite evaluar cómo se modifican los resultados ante variaciones en variables clave, como la tasa de descuento, la vida útil del equipo o el costo de los componentes. Este análisis identifica los factores más críticos que inciden en la viabilidad del proyecto y ayuda a anticipar posibles escenarios adversos.

Análisis de riesgo: Consiste en considerar distintas probabilidades asociadas a escenarios optimistas, pesimistas y más probables. Una herramienta común para este fin es la simulación de Monte Carlo, que permite estimar la variabilidad de los resultados del proyecto.

Consideración de beneficios intangibles: Se recomienda cuantificar, en la medida de lo posible, los beneficios que no tienen un valor monetario inmediato, tales como la mejora en la seguridad, el fortalecimiento de la imagen institucional, la satisfacción de los empleados o la reducción del impacto ambiental.

Análisis incremental: Involucra comparar diferentes alternativas del proyecto (por ejemplo, distintos proveedores o niveles de automatización), para seleccionar aquella que presente la mejor relación costo-beneficio.

Actualización periódica: El análisis no debe verse como una tarea puntual, sino como un proceso continuo que se ajusta con el tiempo conforme se obtenga nueva información o cambien las condiciones tecnológicas y económicas.

Anexo: Presupuesto Estimado y Cronograma de Implementación

Tabla 26

Presupuesto estimado para implementación del plan de mantenimiento basado en RCM

Concepto	Costo Estimado (USD)	Observaciones
Sensores de monitoreo (presión, temperatura, vibración)	\$ 5,00	Para 10 válvulas
Sistema SCADA /software de adquisición de datos	\$ 3,00	Licencia anual
capacitación técnica al personal	\$ 2,00	Incluye 2 talleres presenciales
instalación y configuración del sistema	\$ 2,50	Contratistas externos

Tabla 27

Cronograma general de actividades Primer semestre

Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3
Adquisición de sensores y software	X		
Capacitación del personal técnico		X	
Instalación del sistema de monitoreo		X	X
Pruebas piloto y ajustes			X

Para mejorar el análisis de costo-beneficio: Detallar más los costos: Especificar los costos de adquisición e instalación de los sensores y sistemas de monitoreo, los costos de capacitación del personal, y los costos de mantenimiento del nuevo sistema.

Cuantificar mejor los beneficios: Si es posible, proporcionar estimaciones más precisas de la reducción de los costos de reparación, la disminución de las pérdidas de producción y el ahorro en el consumo de repuestos.

Realizar un análisis de sensibilidad: Mostrar cómo cambia la relación costo-beneficio al variar la tasa de descuento o la vida útil esperada de los equipos.

Discutir los beneficios intangibles: Mencionar y discutir cualitativamente los beneficios en términos de seguridad y reducción del impacto ambiental.

Antecedentes de la Investigación

Los antecedentes de esta investigación se centran en la evolución del mantenimiento industrial, la importancia del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y los desafíos específicos del mantenimiento de válvulas de control en la industria de hidrocarburos, particularmente en separadores trifásicos.

Evolución del Mantenimiento Industrial:

El mantenimiento industrial ha experimentado una transformación significativa a lo largo del tiempo. Inicialmente, las prácticas de mantenimiento eran principalmente reactivas, es decir, se intervenía en los equipos solo después de que ocurría una falla. Con el tiempo, se desarrollaron estrategias más proactivas, como el mantenimiento preventivo, que implica revisiones y reemplazos de componentes a intervalos predefinidos. Sin embargo, estas estrategias a menudo resultaban ineficientes, ya que podían llevar a reemplazos innecesarios o no prevenir fallas inesperadas. En las últimas décadas, metodologías como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) han ganado importancia debido a su enfoque en la optimización de las estrategias de mantenimiento basadas en la criticidad de los equipos y las consecuencias de las fallas.

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM):

El RCM es una metodología que se originó en la industria aeronáutica en los años 60 y que se ha extendido a otros sectores debido a su efectividad en la gestión de fallas y la mejora del

rendimiento de los equipos. A diferencia de los enfoques de mantenimiento tradicionales, el RCM se enfoca en analizar los modos de falla de los equipos, evaluar sus consecuencias y determinar las estrategias de mantenimiento más adecuadas para preservar sus funciones. La aplicación del RCM ha demostrado ser efectiva para mejorar la confiabilidad operativa, reducir los costos de mantenimiento y minimizar las paradas no programadas en diversos sistemas industriales.

Mantenimiento de Válvulas de Control en la Industria de Hidrocarburos:

En la industria de hidrocarburos, las válvulas de control neumáticas desempeñan un papel crucial en la regulación del flujo de fluidos en procesos como la separación trifásica. Sin embargo, estas válvulas están expuestas a condiciones de operación severas, como altas presiones, temperaturas extremas y fluidos corrosivos, lo que puede acelerar su desgaste y aumentar la probabilidad de fallas. Las fallas en las válvulas de control pueden tener consecuencias significativas, incluyendo la pérdida de eficiencia en la producción, el aumento de los costos de mantenimiento, los riesgos de seguridad y los impactos ambientales negativos.

Vacíos en la Investigación y Contribución del Estudio:

A pesar de los avances en las metodologías de mantenimiento, la implementación efectiva del RCM en el contexto específico de las válvulas de control en separadores trifásicos presenta desafíos. Existe una necesidad de desarrollar modelos de mantenimiento que combinen los principios del RCM con tecnologías de automatización y monitoreo en tiempo real para optimizar la detección temprana de fallas y la planificación de las intervenciones. Este estudio se propone abordar estos vacíos mediante el diseño e implementación de un modelo de mantenimiento basado en RCM y automatización, que contribuya a mejorar la confiabilidad,

disponibilidad y seguridad de las operaciones de separación trifásica en la industria de hidrocarburos.

A continuación, se presenta en la figura 12, el cronograma de actividades realizadas.

Figura 12

Cronograma de actividades

	Fase/Actividad Principal	Actividades Específicas	Responsable	Duración Estimada
1	Inicio del Proyecto y Planificación			
1.1	Revisión de la documentación del proyecto	Análisis de los requerimientos del proyecto, alcance y objetivos.	Diego Rojas	1 semana
1.2	Planificación detallada	Elaboración del cronograma, asignación de recursos y definición de roles.	Diego Rojas	1 semana
2	Recopilación de Información			
2.1	Recopilación de datos históricos	Revisión de registros de mantenimiento, informes de fallas y documentación técnica.	Diego Rojas	2 semanas
2.2	Inspección en campo	Evaluación del estado actual de las válvulas, condiciones de operación y entrevistas al personal.	Diego Rojas	2 semanas
3	Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA)			
3.1	Identificación de modos de falla	Determinación de las posibles fallas en las válvulas y sus causas.	Diego Rojas	3 semanas
3.2	Análisis de efectos y consecuencias	Evaluación del impacto de cada falla en la operación del separador trifásico.	Diego Rojas	2 semanas
4	Análisis de Criticidad			
4.1	Evaluación de la criticidad de las fallas	Priorización de las fallas según su severidad, frecuencia y detectabilidad.	Diego Rojas	2 semanas
5	Diseño del Plan de Mantenimiento RCM			
5.1	Selección de estrategias de mantenimiento	Definición de las estrategias de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.	Diego Rojas	3 semanas
5.2	Elaboración del plan de mantenimiento	Documentación detallada de las tareas, frecuencias y recursos necesarios.	Diego Rojas	2 semanas
6	Propuesta de Mejoras y Automatización			
6.1	Diseño de la solución de automatización	Especificación de los sensores, sistemas de monitoreo y herramientas de análisis de datos.	Diego Rojas	3 semanas
6.2	Integración de RCM con automatización	Desarrollo del modelo de mantenimiento que combine RCM y tecnologías de automatización.	Diego Rojas	2 semanas
7	Evaluación y Validación			
7.1	Análisis de viabilidad técnica y económica	Evaluación de los costos y beneficios de la implementación del plan de mantenimiento.	Diego Rojas	2 semanas
7.2	Validación del modelo	Revisión y ajuste del modelo con el apoyo de expertos y personal de mantenimiento.	Diego Rojas	2 semanas
8	Documentación y Presentación Final			
8.1	Elaboración del informe final	Documentación completa del proyecto, resultados, conclusiones y recomendaciones.	Diego Rojas	4 semanas
8.2	Presentación del proyecto	Exposición de los resultados del proyecto ante la universidad y/o la empresa.	Diego Rojas	1 semana

Consideraciones Éticas

Esta investigación se llevará a cabo respetando los principios éticos fundamentales que rigen la investigación científica, asegurando la integridad de los datos, el respeto a los involucrados y la responsabilidad social.

Se regirá además por el Código de Ética de la UNAD y las directrices de la Declaración de Helsinki (2013).

Integridad en la Recolección y Análisis de Datos

La recolección de datos se realizará de manera honesta y objetiva, utilizando los instrumentos y técnicas descritas en la metodología. Estos instrumentos serán validados previamente por al menos dos expertos en mantenimiento.

El análisis de los datos se efectuará con rigurosidad y revisión por pares, evitando cualquier manipulación o alteración que pueda sesgar los resultados.

Se mantendrá la transparencia en el proceso de investigación, documentando detalladamente los procedimientos y decisiones tomadas.

Confidencialidad, Anonimato y Almacenamiento

Se garantizará la confidencialidad de la información proporcionada por el personal de mantenimiento y otros participantes en el estudio.

Los datos recopilados se utilizarán exclusivamente para los fines de esta investigación y se almacenarán en un servidor protegido con contraseña.

La información se conservará durante cinco años y luego será destruida conforme a la política institucional de manejo de datos.

Consentimiento Informado

Se obtendrá el consentimiento informado por escrito, administrado por el investigador principal, en el que se explicarán claramente los objetivos, los procedimientos, los posibles riesgos y beneficios.

Se respetarán los derechos de los participantes a retirarse del estudio en cualquier momento, sin que ello conlleve ninguna consecuencia negativa.

Respeto a los Participantes y Protección de Grupos Vulnerables

Se evitará cualquier forma de discriminación o trato irrespetuoso hacia los participantes.

No se incluirán poblaciones vulnerables; en caso de incorporar a personal con condiciones especiales, se aplicarán protocolos adicionales de protección conforme a la normativa institucional.

Evitación del Plagio y Reconocimiento de Fuentes

Se reconocerá adecuadamente la autoría de las fuentes utilizadas en la investigación, mediante citas y referencias bibliográficas completas en formato APA 7ª edición.

Responsabilidad Social y Ambiental

La investigación se orientará a la generación de conocimiento que contribuya a la solución de problemas relevantes para la industria de hidrocarburos y la sociedad en general.

Se considerarán los posibles impactos ambientales y sociales de las propuestas de mantenimiento, buscando alternativas que promuevan la sostenibilidad y cumpliendo la normativa ambiental nacional (Resolución 909 de 2021) para el manejo de residuos y emisiones.

Conclusiones

La presente investigación demostró que la implementación de una estrategia de mantenimiento basada en Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), complementada con tecnologías de automatización, representa una solución efectiva para optimizar la gestión de las válvulas de control neumáticas de 4" en separadores trifásicos utilizados en operaciones de Well Testing.

El análisis exhaustivo del estado actual de las válvulas reveló condiciones operativas desafiantes y la presencia de modos de falla recurrentes, tales como fugas, atascos, desgaste y corrosión, que impactan negativamente en la eficiencia del sistema. La aplicación de la metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) permitió identificar las causas y consecuencias de estas fallas, priorizando los problemas críticos y estableciendo las bases para definir acciones correctivas pertinentes.

El diseño de un plan de mantenimiento RCM, que integra estrategias de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, se presenta como una alternativa viable para optimizar la confiabilidad y disponibilidad de las válvulas. La propuesta de mejoras en los procedimientos de mantenimiento y la selección de materiales, incluyendo la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real, demostró el potencial para aumentar la vida útil de los equipos, reducir los tiempos de inactividad y optimizar los costos asociados al mantenimiento.

Finalmente, el análisis de costo-beneficio validó la viabilidad técnica y económica de la implementación del plan de mantenimiento RCM, proyectando una reducción significativa en los costos operativos y una mejora en la eficiencia global del sistema de separación trifásica.

Recomendaciones

Implementar monitoreo en tiempo real: Se recomienda la instalación de sensores para medir presión, temperatura y vibraciones en las válvulas, con el fin de anticipar fallas y realizar mantenimiento predictivo de forma efectiva.

Actualizar materiales y componentes: Utilizar materiales de mayor resistencia al desgaste y la corrosión en sellos, actuadores y partes móviles de las válvulas para extender la vida útil del sistema y reducir la frecuencia de intervenciones.

Capacitar al personal técnico: Es fundamental mantener actualizado al equipo de mantenimiento sobre técnicas de análisis de fallas, uso de herramientas de RCM y tecnologías emergentes para asegurar la correcta implementación de las estrategias diseñadas.

Auditorías periódicas de mantenimiento: Se sugiere realizar auditorías semestrales para verificar el cumplimiento del plan RCM, ajustar parámetros y actualizar el análisis FMEA conforme se obtenga nueva información del comportamiento real de las válvulas.

Extensión del RCM a otros equipos críticos: Dado el impacto positivo del RCM en las válvulas, se recomienda aplicar esta metodología a otros componentes del sistema de producción, como bombas, compresores y tanques, con el objetivo de estandarizar la confiabilidad en toda la planta.

Referencias Bibliográficas

- ANSI/ASME. (2020). Standards for mechanical equipment maintenance safety. American Society of Mechanical Engineers.
- CENPE (Centro Nacional de Producción más Limpia). (2019). Guía técnica para la gestión eficiente del mantenimiento industrial. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co>
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos (2.^a ed.). McGraw-Hill.
- International Organization for Standardization. (2014). ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology. <https://www.iso.org/standard/55088.html>
- International Organization for Standardization. (2016). ISO 14224: Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. <https://www.iso.org/standard/68075.html>
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2022). Normativa sobre operación segura en instalaciones de hidrocarburos. <https://www.minminas.gov.co>
- Moubray, J. (1997). Reliability-centered maintenance (2nd ed.). Industrial Press.
- Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). Safety and Health Regulations for General Industry. <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910>
- Rodríguez, V. M. (2023). Análisis técnico de confiabilidad aplicada a válvulas neumáticas de control en separadores trifásicos. Trabajo dirigido de grado, UNAD.

SAE International. (1999). SAE JA1011: Evaluation criteria for RCM processes.
https://www.sae.org/standards/content/ja1011_199908/

SAE International. (2001). SAE JA1012: A guide to RCM standard.
https://www.sae.org/standards/content/ja1012_200101/

Smith, R., & Hawkins, B. (2004). RCM—Gateway to world class maintenance. Elsevier.

Sosa, D. E. (2023). Informe técnico preliminar sobre el desgaste funcional de válvulas neumáticas en pruebas de pozo. Archivo institucional.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. (2024). Guía metodológica para la elaboración de trabajos de grado tipo monografía. <https://www.unad.edu.co>