

**PROCEDIMIENTO OPERATIVO PARA MINIMIZAR LAS FALLAS DE LAS
VÁLVULAS DE COMPUERTA DE LA LÍNEA DE SUCCIÓN DE UN
COMPRESOR CENTRÍFUGO DE ACUERDO CON LA METODOLOGÍA FMEA**

SANDEX JOHAN JIMENEZ PINTO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2023**

**PROCEDIMIENTO OPERATIVO PARA MINIMIZAR LAS FALLAS DE LAS
VÁLVULAS DE COMPUERTA DE LA LÍNEA DE SUCCIÓN DE UN
COMPRESOR CENTRÍFUGO DE ACUERDO CON LA METODOLOGÍA FMEA**

SANDEX JOHAN JIMENEZ PINTO

Director:

**Trabajo presentado como requisito para obtener el título de Especialista en
Gerencia de Mantenimiento**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2023**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Abril de 2023.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.2. IDEA DE INVESTIGACIÓN.....	15
1.3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	15
1.4. HIPÓTESIS.....	16
1.5. OBJETIVOS.....	16
1.5.1. Objetivo general.....	16
1.5.2. Objetivos específicos.....	16
1.6. ALCANCE.....	17
2. MARCO DE REFERENCIA.....	18
2.1. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1.1. Programas de mantenimiento en la industria petrolera.....	18
2.1.2. La metodología FMEA.....	20
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	28
2.3. MARCO NORMATIVO.....	32
2.4. MARCO CONTEXTUAL.....	32
2.4.1. Ecopetrol S. A.....	32
2.4.2. Reseña histórica.....	33
2.4.3. Gerencia de Operaciones de Desarrollo y Producción Piedemonte de Ecopetrol S.A.....	34
2.4.4. Instalaciones del centro de producción, CPF Cusiana.....	35
2.4.5. Recibo de crudo.....	36
3. METODOLOGÍA.....	40
4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	43
4.1. FALLAS QUE PRESENTAN LAS VÁLVULAS.....	43
4.2. SEVERIDAD DE LAS FALLAS DE LAS VÁLVULAS.....	46
4.3. NIVEL DE INCIDENCIA DE LAS FALLAS DE LAS VÁLVULAS.....	46
4.4. TASA DE DIAGNÓSTICO DE LAS FALLAS.....	47
4.5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA FMEA A LA OPERACIÓN DE VÁLVULAS.....	47
4.6. MINIMIZACIÓN DE LAS FALLAS.....	49
4.7. PRUEBA DE LOS ESCENARIOS.....	51
4.8. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FMEA.....	52
4.9. IMPACTO.....	53
4.10. ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO.....	55
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
5.1. CONCLUSIONES.....	58
5.1.1. Primer objetivo.....	58
5.1.2. Segundo objetivo.....	58

5.1.3. Tercer objetivo.....	59
5.1.4. Cuarto objetivo.	59
5.1.5. Quinto objetivo.....	61
5.1.6. Impacto.....	62
5.1.7. Actividades de mantenimiento.....	63
5.2. RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	66

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Guía sugerida para la selección del nivel de severidad.....	23
Tabla 2. Guía sugerida para la selección de la frecuencia de ocurrencia	24
Tabla 3. Guía sugerida para la selección del grado de capacidad de detección...	25
Tabla 4. Normas técnicas relacionadas	32
Tabla 5. Procedimiento para el desarrollo de cada objetivo	40
Tabla 6. Cálculo del Número de Prioridad del Riesgo.....	48
Tabla 7. Escenarios de operación	51
Tabla 8. Resultados de las diferentes fases de la investigación	52
Tabla 9. Costo de la mano de obra para operación y mantenimiento de cada válvula	54
Tabla 10. Costo anual de mano de obra para mantenimiento.....	54
Tabla 11. Comparación de costos en 20 años	55
Tabla 12. Actividades de mantenimiento de las válvulas	56

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>Gear box</i> conectado al vástago de la válvula.....	12
Figura 2. Máquina hidráulica para operación de la válvula	13
Figura 3. Desgaste del vástago de la válvula	14
Figura 4. <i>Gear box</i> y componentes desgastados	14
Figura 5. Diagrama de flujo para la ejecución de FMEA	25
Figura 6. Instalaciones del CPF Cusiana Ecopetrol S.A.	35
Figura 7. Sección de recibo de crudo.....	37
Figura 8. Sección de reinyección de gas agrio.....	38
Figura 9. Sección de compresión de gas dulce.....	38
Figura 10. Sección Planta GLP	39
Figura 11. Fases de la investigación	41
Figura 12. Daño en los engranajes de las válvulas	43
Figura 13. Deterioro de los alojamientos de los rodamientos.....	44
Figura 14. Daños de los rodamientos.....	45
Figura 15. Vástago y tuerca sinfín dañados	45

RESUMEN

En este trabajo se propone el procedimiento a seguir para minimizar las fallas de las válvulas de compuerta de la línea de succión de un compresor centrífugo mediante la metodología FMEA; en primer lugar, se obtuvo la información relacionada con las fallas que presentan las válvulas objeto de análisis, y luego se caracterizó la severidad de las fallas de las válvulas, se determinó el nivel de incidencia de las fallas de las válvulas y se estableció la tasa de diagnóstico de las fallas, siguiendo los procedimientos establecidos en la metodología FMEA.

Las válvulas presentan fallas en los rodamientos, las carcasas, los engranajes, así como en la tuerca sinfín y el vástago, lo que hace que se haga imposible su maniobra, afectando a toda la instalación de los compresores de la estación de bombeo. El número de prioridad del riesgo (RPN) es de 810. En el trabajo se proponen y analizan diferentes alternativas para solucionar los inconvenientes operativos generados por las condiciones de operación y las características de las válvulas, con base en el análisis de tres escenarios de operación adicionales al actual.

Palabras claves: procedimiento operativo, válvulas de compuerta, FMEA, escenarios de operación.

ABSTRACT

This work proposes the procedure to be followed to minimize the failures of the gate valves of the suction line of a centrifugal compressor using the FMEA methodology; Firstly, the information related to the failures presented by the valves under analysis was obtained, and then the severity of the valve failures was characterized, the level of incidence of valve failures was determined and the rate was established. fault diagnosis, following the procedures established in the FMEA methodology.

The valves present faults in the bearings, the casings, the gears, as well as in the endless nut and the stem, which makes their maneuver impossible, affecting the entire installation of the compressors of the pumping station. The risk priority number (RPN) is 810. In the work, different alternatives are proposed and analyzed to solve the operational problems generated by the operating conditions and the characteristics of the valves, based on the analysis of three operating scenarios. additional to the current one.

Keywords: operating procedure, gate valves, FMEA, operating scenarios.

GLOSARIO

CMMS: *Computerized Maintenance Management System* (Sistema Computarizado para la Administración del Mantenimiento).

CPF: Centro de Facilidades de Producción.

DFMEA: Design FMEA.

ECM: *Effectiveness Centered Maintenance* (mantenimiento centrado en la eficacia).

FMEA: Failure Mode and Effects Analysis (Análisis Modal de Fallos y Efectos)

GEAR BOX: caja de engranajes.

GLP: Gas licuado de petróleo.

MFMEA: Machinery FMEA.

NASA: National Aero Space Administration.

PFMEA: Process FMEA.

PM: Mantenimiento preventivo.

RCM: *Reliability Centred Maintenance*, Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.

RPN: Risk Priority Number (número de prioridad del riesgo).

RUT: Reglamento Único de Transporte de Gas Natural.

SFMEA: System FMEA (Sistema FMEA).

TMEF: Tiempo medio entre fallas.

TPM: Mantenimiento preventivo total.

VRU: Unidad de recuperación de vapores.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se mencionó anteriormente, en el CPF Cusiana se cuentan con seis compresores centrífugos acoplados a una turbina de gas, los cuales realizan su descarga al cabezal de gas ventas y otros al cabezal de reinyección. En una instalación de la industria petrolera localizada en el municipio de Tauramena , departamento de Casanare, se encuentra una estación de bombeo de gas comprimido. Esta estación está conformada por tres compresores centrífugos que succionan el gas y lo descargan a la presión necesaria para ser inyectado nuevamente a los yacimientos. El mantenimiento preventivo de estos compresores está programado para efectuarse cada dos años y antes de efectuarlo, cada compresor se debe aislar mediante una válvula ubicada en la línea de succión correspondiente, de manera que se pueda realizar la intervención completa de cada equipo.

La línea de succión en donde se localizan la válvula de cortina tiene un diámetro de 20"x1500. A su vez, la línea de descarga tiene un diámetro de 16" y cuenta una válvula de bola.

Cuando se instalaron los compresores y las válvulas, la operación de éstas se hacía de forma manual; sin embargo, el movimiento de estas válvulas es muy lento debido a las dimensiones de la tubería y a la presión de operación del compresor, por lo que cada vez que se necesitaba operarlas se requería contar con cuatro operarios, quienes debían girar la palanca de entrada de la caja de engranajes (*gear box*) que se encarga de transmitir de forma lenta el movimiento al vástago de la válvula. En la Figura 1 se muestra el *gear box* conectado en la parte superior del vástago de la válvula.

Figura 1. Gear box conectado al vástago de la válvula



Nota: elaboración propia.

Como se observa en la Figura 1, el *gear box* se ubica en la parte superior de la válvula y genera el movimiento del vástago en la medida en que se hace girar el eje de entrada del *gear box*.

Posteriormente, con el fin de facilitar y reducir el tiempo de estas maniobras de apertura o cierre de las válvulas, se decidió instalar una máquina hidráulica (ver Figura 2), lo que permitió reducir en 70% el tiempo de maniobra. Si bien se logró el objetivo de facilitar la maniobra y reducir el tiempo requerido para la apertura y cierre de la válvula, desde que se hace uso de la máquina hidráulica se han presentado otras fallas en la válvula debido al incremento en la velocidad de operación.

Figura 2. Máquina hidráulica para operación de la válvula



Nota: elaboración propia

En la Figura 2 se muestra la máquina hidráulica que se utiliza para la operación de la válvula; esta máquina consta de una motobomba que cuenta con un encendido eléctrico mediante una batería y que genera la presión hidráulica necesaria para accionar el eje de la válvula.

Uno de los daños se presentó en el vástago de la válvula, como se muestra en la Figura 3, cuyo desgaste se ha visto drásticamente acelerado debido a la intensidad de las fuerzas que genera la máquina hidráulica

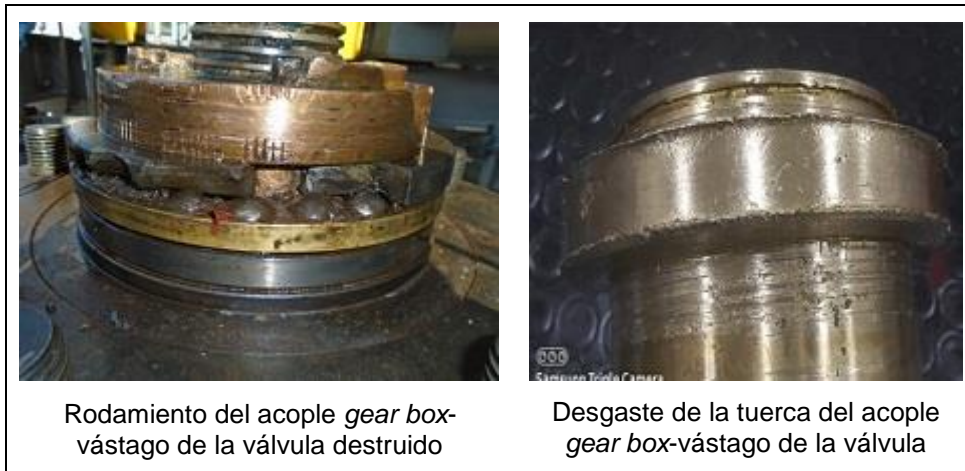
Figura 3. Desgaste del vástago de la válvula



Nota: elaboración propia

Así mismo, se han presentado fallas recurrentes en el *gear box*, cuyos componentes internos terminaron por destruirse, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Gear box y componentes desgastados



Rodamiento del acople *gear box*-vástago de la válvula destruido

Desgaste de la tuerca del acople *gear box*-vástago de la válvula



Destrucción interna del rodamiento de acople *gear box*-vástago

Nota: elaboración propia.

Como se observa en las fotografías presentadas en la Figura 4, la manipulación de la válvula por medio de la máquina hidráulica terminó por destruir de forma progresiva los componentes internos del *gear box*, por lo cual este elemento quedó fuera de operación, lo que hizo inviable volver a abrir o cerrar la válvula. Al no poder operar la válvula, tampoco se puede hacer mantenimiento al compresor centrífugo.

Ante la situación descrita, el presente trabajo busca desarrollar la idea de investigación que se plantea a continuación.

1.2. IDEA DE INVESTIGACIÓN

Fallas en el actuador mecánico de válvulas de compuerta de la línea de succión de un compresor centrífugo.

1.3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál debe ser el procedimiento operativo que se debe seguir para minimizar las fallas de las válvulas de compuerta de la línea de succión de un compresor centrífugo de acuerdo con la metodología FMEA?

1.4. HIPÓTESIS

Como respuesta hipotética a la pregunta de investigación se plantea que, de acuerdo con la metodología FMEA, el procedimiento operativo que se debe seguir para minimizar las fallas de las válvulas de compuerta de la línea de succión del compresor centrífugo debe basarse en el empleo de una válvula de repuesto que permita hacer la reparación de la unidad sin afectar la operación del compresor.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general.

Proponer el procedimiento a seguir para minimizar las fallas de las válvulas de compuerta de la línea de succión de un compresor centrífugo mediante la metodología FMEA.

1.5.2. Objetivos específicos.

1. Obtener la información relacionada con las fallas que presentan las válvulas objeto de análisis.
2. Caracterizar la severidad de las fallas de las válvulas de acuerdo con su impacto en la operación del sistema.
3. Determinar el nivel de incidencia de las fallas de las válvulas de acuerdo con los efectos que causan en la disponibilidad del sistema.
4. Establecer la tasa de diagnóstico de las fallas según la experiencia de los responsables de la operación y el mantenimiento de las válvulas.
5. Aplicar metodología FMEA a la operación de válvulas 20"x1500 instaladas en línea de succión de compresores centrífugos.

1.6. ALCANCE

El alcance del trabajo comprende la comparación de alternativas tendientes a mejorar las condiciones de operación de la válvula.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Programas de mantenimiento en la industria petrolera.

La industria petrolera tiene una especial importancia en Colombia, por dos razones diferentes. En primer lugar, la exportación de crudo es la principal fuente de divisas que ha tenido el país por varios años; junto con el carbón han sustituido desde hace varias décadas a las exportaciones de café, por lo que es una actividad cuya permanencia tiene alto impacto en todos los proyectos financiados con recursos públicos, en sectores como la educación, la seguridad, la salud, entre otros¹. La segunda razón, tanto o más importante, es que los diferentes derivados del petróleo y especialmente los combustibles siguen siendo indispensables en el país y en el mundo para que se mantengan activas las industrias, los vehículos, las viviendas y todas aquellas máquinas o dispositivos que utilizan combustibles fósiles, lo que incluye también algunas centrales termoeléctricas².

La parálisis de una planta de refinación de crudo representa un serio problema no solo para todos los usuarios y consumidores de sus productos, sino una seria amenaza para las finanzas públicas. Cuando se prolonga una parada programada de una de estas refinerías el Estado, a través de Ecopetrol y el Ministerio de Minas y Energía, se ven en la necesidad de importar combustibles a precios normalmente muy altos y en cantidades muy grandes esos combustibles, lo cual puede poner en peligro no solo la actividad de diferentes sectores industriales y familiares, sino las reservas internacionales de dólares que administra el Banco de la República³. En

¹ GUDYNAS, E. Los nudos del petróleo en Colombia: ambiente y ciencia, política y democracia. Palabras al margen, 2018, pp. 122, 22-31.

² CORREDOR, G. Colombia y la transición energética. Ciencia política, 13(25), 2018, pp. 107-125.

³ PERRY, G. El petróleo en la economía colombiana. Bogotá 2019, Fedesarrollo.

resumen, una inadecuada gestión de estas paradas de mantenimiento representa al mismo tiempo un problema social y económico de importantes dimensiones.

La situación descrita hace que se presente un alto nivel de exigencia en las fases de planeación y ejecución de los planes de mantenimiento de las plantas de refinación de crudo, más conocidas simplemente como refinerías. En Colombia existen solamente dos refinerías de crudo, una en Barrancabermeja y la otra en Cartagena; la presión que se ejerce desde los altos cargos relacionados con la actividad petrolera para que se reduzcan los tiempos destinados a hacerles mantenimiento a los equipos de las refinerías representa un reto para los ingenieros y demás especialistas que en el campo tienen la responsabilidad de garantizar la operatividad de todos los componentes de esas plantas⁴.

En el terreno estrictamente técnico, ese nivel de exigencia hace necesario que las fases de planeación y ejecución de los programas de mantenimiento de las refinerías se elaboren con la máxima eficiencia y eficacia posibles, es decir, que se logren no solamente los mejores resultados en cuanto a la conservación de los equipos intervenidos, sino que se haga en el menor tiempo posible y a un costo razonable⁵.

A lo anterior se suma el hecho de que en esas refinerías existen equipos e instalaciones que no son comunes en otras plantas industriales. Esto quiere decir que para darles mantenimiento a estas instalaciones se requieren conocimientos, equipos y técnicas de mantenimiento que solamente tiene un grupo relativamente escaso de personas y empresas. A diferencia de otras empresas como las de alimentos u otro tipo de insumos o productos de consumo masivo, no se puede ir a

⁴ ANDRADE, D. Análisis de la seguridad energética en la cadena de suministro del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2019.

⁵⁵ CALVO, C. Técnica de gamma scanning para el diagnóstico en operación, de equipos de refinación de petróleo y gas natural. Perfiles de Ingeniería, 16(16), 2020, pp. 65-75.

una ferretería a adquirir tales componentes, y solamente se puede vincular para esos proyectos de mantenimiento a personas realmente expertas, que conozcan las regulaciones técnicas aplicables, los procedimientos de seguridad, los estándares técnicos y demás especificaciones que se deben respetar y observar para poder garantizar la eficacia y la eficiencia esperadas.

2.1.2. La metodología FMEA.

FMEA es un método para el análisis de confiabilidad orientado al establecimiento de un proceso sistemático que, antes de la implementación de un diseño / proceso, busca todos los problemas potenciales que pueden causar fallas y proporciona una evaluación de riesgos para que se puedan aplicar las medidas apropiadas para eliminar o reducir el riesgo de tales fallas⁶. También se puede describir como un método de análisis de confiabilidad destinado a identificar fallas que tienen consecuencias que afectan el funcionamiento de un sistema. El FMEA se aplicó como enfoque analítico del Plan de Energía de Aeronaves a principios de la década de 1950 y, según los requisitos del Grupo de Acción de la Industria Automotriz, se convirtió en uno de los cinco manuales del sistema de calidad.

En la actualidad, FMEA se aplica ampliamente en diversas industrias, incluida la aviación, automóviles, electrónica, semiconductores y equipos médicos. Además, el FMEA se está aplicando gradualmente en la industria de servicios, como en el comercio electrónico.⁷

⁶ VILLARINI M., CESAROTTI V., ALFONSI L., INTRONA, V. Optimization of photovoltaic maintenance plan by means of a FMEA approach based on real data. *Energy Conversion and Management*, 152, 2017, pp. 1-12.

⁷ FILZ Marc, BERNHARD Jonas, HERRMANN Christoph, THIEDE Sebastian. "Data-driven failure mode and effect analysis (FMEA) to enhance maintenance planning". *Computers in Industry* 129, 2021, pp. 103-134.

Convencionalmente, la estimación de FMEA utiliza el cálculo del número de prioridad de riesgo (en inglés *Risk Priority Number-RPN*), que indica la gravedad, frecuencia de ocurrencia y detección de productos, que se muestra como

$$RPN = S \times O \times D$$

En esta ecuación, S mide la severidad del impacto de un modo de falla potencial en relación con la satisfacción del cliente como la preocupación primordial y la pérdida de equipo o personal que se evalúa; la frecuencia de ocurrencia O predice la frecuencia del factor / estructura de falla; y la detección (D) detecta los factores de falla o el índice de evaluación⁸.

S, O y D se califican con una calificación de 1 a 10, de acuerdo con la menor o mayor gravedad, frecuencia de ocurrencia y una detección más baja. Además, el número de prioridad de riesgo (RPN) se puntúa con base en el hecho de que cuanto mayor es el RPN general, más importante es el modo de falla. Se deben tomar las medidas de mejora necesarias cuando el RPN es superior a 100 y S es mayor o igual a 8. Además, una vez que se ha abordado la falla, el RPN debe volver a calcularse para comprender mejor la reducción del riesgo relacionada y confirmar la efectividad de las correcciones realizadas. En conclusión, el RPN se aplica a menudo para identificar problemas potenciales y se puede utilizar para emprender un sistema de mantenimiento activo, de modo que el departamento de gestión pueda estar al tanto de los problemas potenciales y también hacer predicciones como las condiciones de funcionamiento del equipo⁹.

⁸ BATTIROLA Julio Cesar, PIECHNICKI Flávio, Rocha Eduardo, PORTELA Eduardo. "Process-aware FMEA framework for failure analysis in maintenance". Journal of Manufacturing Technology Management, Sao Paulo, 2017.

⁹ SRIVASTAVA P, KHANDUJA D, AGRAWAL V. Mitigation of risk using rule based fuzzy FMEA approach. 8th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence), 2018, pp. 26-30.

Este método fue utilizado por primera vez por expertos de la NASA en 1963¹⁰. Mediante el uso de FMEA, se puede definir qué defecto se puede prevenir y si es posible realizar alguna acción para evitar fallas accidentales. Cuando se utiliza FMEA en la metodología de mantenimiento basado en la confiabilidad RCM, puede optimizar los procedimientos de mantenimiento para reducir el tiempo de inactividad de emergencia, disminuir la duración del ciclo de mantenimiento y reducir significativamente los costos¹¹. Entre las mejores características de FMEA se pueden mencionar acciones proactivas en lugar de reactivas para gestionar errores, fallas, defectos, etc. De hecho, FMEA es un método preventivo, lo que significa que, al usar este método, los errores potenciales pueden eliminarse antes de que se presenten.

Este método se aplica en otros países e industrias con nombres similares como *System FMEA* (SFMEA), *Design FMEA* (DFMEA), *Process FMEA* (PFMEA), *Service FMEA* (SFMEA) y *Machinery FMEA* (MFMEA)¹². Este método se acompaña de un proceso de ponderación a factores como gravedad, ocurrencia, capacidad de detección, procesos necesarios y unidades para realizar acciones correctivas. De hecho, el valor del número de prioridad de riesgo (RPN) como el número básico de caso de falla potencial es el resultado de la multiplicación de tres factores que incluyen la gravedad, la ocurrencia y la capacidad de detección. En la Tabla 1 se presenta una guía sugerida para definir el nivel de severidad, propuesta por la norma QS9000; esta norma define las expectativas fundamentales del sistema de la calidad de Chrysler, Ford y General Motors, y de los fabricantes de camiones y

¹⁰ CERVANTES Marcial, PALI Ramón, ZAVALA José. "Aplicabilidad de la criticidad en el mantenimiento de equipos". Project Design and Management 1, 2019.

¹¹ PÉREZ, Jesús. Propuesta de mantenimiento centrado en confiabilidad en el área de reacción PROQUIVER, SA DE CV. Universidad Veracruzana, México, 2018.

¹² SHAHRABI Mahmood y ABBAS Amir. "Application of FMEA and AHP in Lean Maintenance". International Journal of Modern Engineering Sciences 3, 2014, pp. 61-73.

otras compañías, respecto de los proveedores internos y externos de piezas para producción y servicio posventa, así como de materiales.¹³

Tabla 1. Guía sugerida para la selección del nivel de severidad

Efecto	Indicador: significancia del efecto de falla	Grado
Peligro sin preaviso	Un efecto de muy alta intensidad en la seguridad del operador, la fábrica o el personal de mantenimiento o que no cumpla con las reglas estatales.	10
Peligro con preaviso	Un efecto de alta intensidad en la seguridad del operador, la fábrica o el personal de mantenimiento o que no cumpla con las reglas estatales.	9
Tiempo de inactividad muy largo con una alta tasa de producción de fallas	Más de 8 horas de inactividad o producción de piezas defectuosas durante 4 horas	8
Tiempo de inactividad prolongado con una alta tasa de producción de fallas	Tiempo de inactividad de 4-8 horas o fallas durante 2-4 horas	7
Tiempo de inactividad promedio con una tasa de fallas de operación	1-3 horas de inactividad o fallas durante 1-2 horas	6
Bajo tiempo de inactividad con una tasa de fallas de operación	Tiempo de inactividad de ½ a 1 hora o fallas durante 1 hora	5
Efecto muy bajo	Tiempo de inactividad de ½ hora sin fallas	4
Efecto insignificante	La variación de los parámetros (producto o proceso) está fuera de control. Es necesaria la regulación mediante otros controles. Con desempeño defectuoso.	3
Efecto muy insignificante	La variación del parámetro (producto o proceso) está en el rango de control. Es necesaria la regulación mediante otros controles. Con desempeño defectuoso.	2
Sin efecto	La variación del parámetro (producto o proceso) está en el rango de control. Es necesaria la regulación mediante otros controles. El sistema se puede comprobar durante el tiempo entre dos turnos. Con desempeño defectuoso.	1

¹³ GRUSZKA Józef y MISZTAL Agnieszka. "The new IATF 16949: 2016 standard in the automotive supply chain". Research in logistics & production, 2017, pp. 7-17.

Nota: elaboración propia a partir de SHAHRABI y ABBAS.¹⁴

En la Tabla 2 se presenta la guía sugerida para la selección de la frecuencia de ocurrencia.

Tabla 2. Guía sugerida para la selección de la frecuencia de ocurrencia

Ocurrencia	Tasa de falla	Grado
Fallo muy alto e inevitable	Uno de cada 10 horas de operación tiempo medio entre fallas TMEF<1 hora	10
	Una de cada 100 horas de operación o TMEF entre 1 y 2 horas	9
Fallo de alta repetición	Una de cada 1000 hora de operación o TMEF entre 11 y 100 horas	8
	Una de cada 10000 hora de operación o TMEF entre 101 y 400 horas	7
Promedio de fallas aleatorias	TMEF entre 401 y 1000 horas	6
	TMEF entre 1001 y 2000 horas	5
	TMEF entre 2001 y 3000 horas	4
Fallos bajos-relativamente bajos	TMEF entre 3001 y 6000 horas	3
	TMEF entre 6001 y 10000 horas	2
Rara vez, muy baja probabilidad.	TMEF mayor de 10000 horas	1

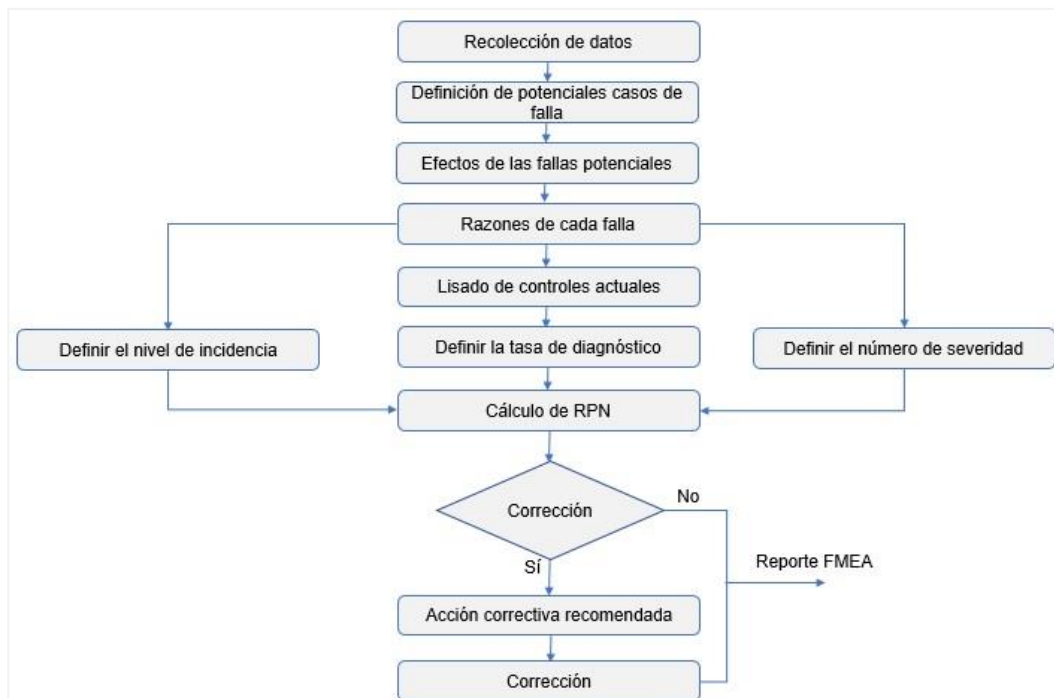
Nota: elaboración propia a partir de SHAHRABI y ABBAS.¹⁵

La siguiente Figura 5 muestra el diagrama de flujo de la ejecución de FMEA.

¹⁴ SHAHRABI y ABBAS, Óp. Cit.

¹⁵ SHAHRABI y ABBAS, Óp. Cit.

Figura 5. Diagrama de flujo para la ejecución de FMEA



Nota: elaboración propia a partir de SHAHRABI y ABBAS.¹⁶

Para definir el nivel de severidad, ocurrencia y capacidad de detección, se debe utilizar una guía de calificación adecuada y aprobada por todos los interesados. A su vez, en la Tabla 3 se presenta la guía para la selección del grado de capacidad de detección.

Tabla 3. Guía sugerida para la selección del grado de capacidad de detección

Detección	Escala: probabilidad de detección controlando el sistema	Grado
Completamente desconocido	Los controles del sistema no pueden identificar las razones y el modo de falla o no hay control del sistema	10
Muy rara vez	Rara vez los controles del sistema encuentran razones o casos de falla	9
Rara vez	Rara vez los controles del sistema encuentran razones o casos de falla. Los controles del sistema muestran posibles señales de falla	8

¹⁶ SHAHRABI y ABBAS, Óp. Cit.

Detección	Escala: probabilidad de detección controlando el sistema	Grado
Muy baja	Existe una probabilidad muy baja de que los controles del sistema encuentren la razón o los casos de falla. Los controles del sistema evitan posibles fallas o paradas del sistema	7
Baja	Existe una baja probabilidad de que los controles del sistema encuentren la razón o los casos de falla. Los controles del sistema evitan posibles fallas o paradas del sistema	6
Promedio	Existe una probabilidad media de que los controles del sistema encuentren la razón o los casos de falla. Los controles del sistema evitan posibles fallas. La razón del fracaso está aislada	5
Relativamente alta	Existe una probabilidad media de que los controles del sistema encuentren la razón o los casos de falla. Los controles del sistema evitan posibles fallas. La razón de la falla es aislada y es necesario el sistema de control	4
Alta	Existe una alta probabilidad de que los controles del sistema encuentren la razón o los casos de falla. Los controles del sistema evitan posibles fallas. La razón de la falla es aislada y es necesario un sistema de control	3
Muy alta	Existe una probabilidad muy alta de que los controles del sistema encuentren la razón o los casos de falla. Es posible que el control del sistema no sea necesario	2
Absolutamente	Los controles del sistema encuentran la razón o los casos de falla. Es posible que el control del sistema no sea necesario	1

Nota: elaboración propia a partir de SHAHRABI y ABBAS.¹⁷

La técnica de FMEA tiene gran importancia para la evaluación de posibles fallas en un sistema, dado que propicia un análisis objetivo del sistema para justificar cambios, analizar modos de falla comunes y demostrar la atención a los requisitos de seguridad¹⁸. La técnica FMEA puede proporcionar a la empresa un medio sistemático de catalogación de información sobre las fallas; mejor conocimiento sobre los problemas en los procesos; acciones de mejora basadas en datos debidamente monitoreados; reducción de costos mediante la prevención de fallas;

¹⁷ SHAHRABI y ABBAS, Óp. Cit.

¹⁸ DA SILVA Gisele, GARCIA José, CHIARI Ethel. "Limitações da ferramenta FMEA: estudo de suas aplicações em uma empresa do segmento automotivo". Revista Brasileira Multidisciplinar 20, no. 2, 2017, pp. 69-79.

el beneficio de incorporar dentro de la organización la actitud de prevención de fallas, la actitud de cooperación y trabajo en equipo.

El FMEA se utiliza para identificar y eliminar fallas conocidas o potenciales para mejorar la confiabilidad y seguridad de sistemas complejos y está destinado a proporcionar información para tomar decisiones de gestión de riesgos. Como se explicó arriba, el modo de falla se evalúa bajo los parámetros de gravedad o seriedad (S), probabilidad de ocurrencia (O) y dificultad de detección (D) del modo de falla. A continuación, las prioridades de riesgo de los modos de falla se determinan a través del Número de prioridad de riesgo (RPN), que es el producto de S, O y D de una falla.

El FMEA ha demostrado su capacidad para evitar que se presenten fallas y errores en el sistema. Sin embargo, el método RPN convencional ha sido criticado en la literatura porque la conversión de puntajes es diferente para los tres factores de riesgo (S, O y D), el RPN no puede usarse para medir la efectividad de las acciones correctivas, los tres factores de riesgo los factores (S, O y D) son difíciles de evaluar con precisión, etc.¹⁹

FMEA ha demostrado ser una de las técnicas preventivas de fallas en diversos campos, como la fabricación, la medicina, la ingeniería civil y la automoción. Además de RPN, una de las falencias del FMEA se relaciona con los modos de falla que faltan. Al comenzar la aplicación de este procedimiento, se requiere que los profesionales identifiquen los modos de falla y pueden faltar algunos que dificultan o limitan la eficiencia del análisis.

En segundo lugar, se requiere una lluvia de ideas para determinar los problemas, las causas y las soluciones en FMEA y la evaluación de riesgos para los modos de

¹⁹ FIGUEROA CAMPA, J. Aumento de confiabilidad y eficiencia en departamento de diseño de producción de una empresa productora de arneses. Sonora, 2021. Universidad de Sonora.

falla. La lluvia de ideas involucra la participación de un grupo de personas con experiencia y conocimiento; sin embargo, pueden enfrentar la limitación de la lluvia de ideas que se conoce como inercia psicológica; esta inercia se relaciona con la resistencia al cambio, ya que impide que la mente humana alcance su máximo potencial, limita la innovación y la creatividad. Esto sucede porque los límites y las restricciones tienden a aparecer en la mente de la persona cuando tiene en mente un conjunto de reglas y regulaciones²⁰.

Las anteriores observaciones o críticas del FMEA deben tenerse en cuenta cuando se aplique de forma concreta a un caso de estudio como el presente, por lo que se deben registrar advertencias sobre las limitaciones de los resultados con el propósito de darle mayor confiabilidad a los resultados.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

En la literatura especializada se han distinguido diez tipos o técnicas de mantenimiento, que se diferencian entre sí por el carácter de las tareas que incluyen. En este apartado se hace referencia a la definición breve de cada una de las técnicas.

- PM, mantenimiento preventivo. Una serie de tareas que se realizan con una frecuencia dictada por el paso del tiempo que permite una adaptación óptima con la reparación mínima. Se basa en la condición del equipo²¹.

²⁰ HÉRNANDEZ, C. Propuesta de proceso de cambio socio-técnico en una empresa de acumuladores de energía para la producción de acumulares de ion-litio. Cali, 2019. Universidad del Valle.

²¹ GARCÍA, Mario. "Una polémica trascendental sobre el mantenimiento Preventivo y Predictivo". Revista Investigaciones Sociales 3, no. 8, 2017, pp. 1-11.

- TPM, Mantenimiento productivo total. Originario de Japón se centra en la solución de los problemas de mantenimiento utilizando el método de los círculos de calidad. Algunas de las ventajas de la implementación de TPM en una organización son mejor comprensión del funcionamiento de los equipos, la mejora del trabajo en equipo, enfoque menos contradictorio entre la producción y el mantenimiento, etc.²²
- CMMS, *Computerized Maintenance Management System*. Proporcionan capacidades para almacenar recuperar y analizar información. Utiliza un enfoque de análisis de decisión formalizada con base en múltiples criterios y el sistema basado en reglas para encontrar los peores equipos o máquinas²³.
- RCM, *Reliability Centred Maintenance*, (Mantenimiento Centrado en Fiabilidad/Confiabilidad. Enfoque centrado en la fiabilidad fue fundada en la década de 1960 y se orientó inicialmente hacia el mantenimiento de aeronaves. Dirige los esfuerzos de mantenimiento en aquellas partes y unidades donde la fiabilidad es crítica²⁴.
- El mantenimiento predictivo. El mantenimiento predictivo consiste en decidir si debe o no mantener un sistema de acuerdo con su estado.
- Externalización de mantenimiento. Se refiere a la transferencia de la carga de trabajo a los extranjeros con los objetivos de conseguir el mantenimiento de mayor calidad a un costo más rápido, más seguros y más bajos²⁵.

²² ALFARO Alexandra, YAYA Javier, CHUCUYA Roberto. "Implementación del Mantenimiento Productivo Total en la mejora de la productividad y mantenibilidad del proceso de harina de pescado". *INGnosis Revista de Investigación Científica* 5, no. 2, 2019, pp. 126-138.

²³ MEDENOU Daton, LATIF Fagbemi, ROLAND Houessouvo, Thierry Jossou, MÊTOWANOU Ahouandjinou. "Medical devices in sub-Saharan Africa: optimal assistance via a computerized maintenance management system (CMMS) in Benin". *Health and Technology* 9, no. 3, 2019, pp. 219-232.

²⁴ AMAYA Alejandro, PEÑALOZA Marieth, CÉSPEDES Jesús. "Modelo para el mantenimiento de equipos automatizados en mecanizo CNC del sector metalmecánico colombiano". *Aglala* 10, no. 1, 2019, pp. 269-296.

²⁵ LAGOS, Carlos. "Un modelo de optimización dinámica para la planificación eficiente de tareas de mantenimiento de aviones", Santiago de Chile, Universidad de Chile, 2019.

- ECM, Mantenimiento Centrado en la Eficacia. El mantenimiento centrado en la eficacia hace hincapié en "hacer lo correcto" en lugar de "hacer las cosas bien". Este enfoque se centra en las funciones del sistema y servicio al cliente, y tiene varias características que son útiles para mejorar el rendimiento de las prácticas de mantenimiento y abarca conceptos básicos de gestión de la calidad²⁶.
- Gestión de mantenimiento estratégico. El mantenimiento es visto como una actividad multidisciplinaria.
- Mantenimiento basado en el riesgo. Mantenimiento basado en el riesgo asegura una reunión de estrategia mantenimiento de sonido el doble objetivo de minimización de riesgos causados por fallo inesperado de los equipos y una estrategia rentable²⁷.

Así mismo, el término mantenimiento hace referencia al conjunto de actividades técnico-administrativas desarrolladas que se llevan a cabo con el fin de conservar las propiedades (inmuebles, equipos, instalaciones, herramientas, etc.), en condiciones de funcionamiento seguro, eficiente y económico, con el propósito de evitar la presencia de daños o de repararlos, cuando ya se hubiesen producido esos daños.

Entre tanto, el mantenimiento correctivo es aquel que se efectúa cuando se desea restaurar la integridad, la seguridad o el funcionamiento de un dispositivo después de que ha presentado una avería. Se caracteriza por hacerse de manera no planificada, por lo que no incluye el diagnóstico fiable de las fallas, pues en general,

²⁶ GARCÍA Judit y GARCÍA Jesús. "La eficacia instruccional de dos enfoques virtuales: procesos y producto". Revista de Psicodidáctica 23, no. 2, 2018, pp. 117-127.

²⁷ CARO, Cristian. Desarrollo de una estrategia de mantenimiento basada en análisis de riesgo y confiabilidad para atracciones mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Mecánica, Bogotá, UNAD, 2019.

su interés no es determinar si el activo fue objeto de mal trato, abandono, desconocimiento del manejo, desgaste natural, etc.

En el argot de la ingeniería también se incluyen las inspecciones de mantenimiento, ideadas con el fin de verificar el desempeño o funcionamiento de un equipo o dispositivo; en la prueba se realiza una comparación entre el desempeño actual y las especificaciones técnicas definidas por el fabricante en el manual de servicio o mantenimiento. El objetivo de las inspecciones de mantenimiento no es la prolongación de la vida útil del equipo o dispositivo; en cambio, se propone evaluar su estado actual.

En una empresa organizada también se dispone de rutinas de mantenimiento preventivo, que son unas guías sobre la forma en que se deben ejecutar las actividades y procedimientos propios del mantenimiento preventivo en los equipos e instalaciones. En la medida en que se apliquen debidamente las rutinas de mantenimiento, se alcanza la máxima eficiencia, lo que redundará en mayores tasas de disponibilidad de los equipos.

Las acciones de mantenimiento se consignan en la hoja de vida de cada equipo, que es un registro continuo de la información básica y específica de las acciones de mantenimiento, así como las reparaciones o adecuaciones. Esa hoja de vida incluye la ficha técnica y una descripción más o menos detallada de los informes de mantenimiento; este documento se utiliza para decidir sobre la necesidad de acciones pendientes de acuerdo con las rutinas de mantenimiento preventivo, así como sobre la sustitución o actualización de cada equipo o dispositivo²⁸.

²⁸ MAYORGA Alex y QUISHPE Jeverson. Deontología aplicada al mantenimiento de maquinaria industrial por ingenieros mecánicos. Buenos Aires, Universidad Nacional de La Plata, 2019.

2.3. MARCO NORMATIVO

Las normas técnicas relacionadas con el desarrollo del presente trabajo se describen en la Tabla 4.

Tabla 4. Normas técnicas relacionadas

Norma	Descripción
Norma EN-13306	Norma europea cuyo propósito es la definición de los términos genéricos usados en todos los tipos de mantenimiento y en la gestión del mantenimiento, independientemente del tipo de elemento considerado, con la excepción de los programas informáticos.
Norma AFNOR NFX 60-010	Especifica el conjunto de acciones realizadas con el propósito de restablecer o mantener un bien en un determinado estado de calidad de servicio. Presenta discrepancia con la norma EN-13306 en lo relacionado con la clasificación de los diversos tipos de mantenimiento.
Norma EN-13460	Esta norma se denomina "Documentos para el mantenimiento". En su anexo C propone el flujo de trabajo del mantenimiento, como punto de partida del análisis para obtener la documentación necesaria para la completa información de la gestión de mantenimiento
Norma ISO14224	Proporciona una base sólida para recopilar y estructurar los datos de confiabilidad y mantenimiento para equipos de instalaciones en industrias de petróleo, gas natural y petroquímica, que son la base para la gestión de los activos durante su ciclo de vida
UNE 200001-3-11:2003	Gestión de la confiabilidad. En su parte 3-11 incluye la guía de aplicación del mantenimiento centrado en la fiabilidad
UNE-EN 15341:2008	Mantenimiento. Indicadores clave de rendimiento del mantenimiento
UNE-EN 61703:2003	Expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y de logística de mantenimiento

Nota: elaboración propia.

2.4. MARCO CONTEXTUAL

2.4.1. Ecopetrol S. A.

Ecopetrol S.A. es una Compañía organizada bajo la forma de sociedad anónima, del orden nacional, vinculada al Ministerio de Minas y Energía. Es una sociedad de

economía mixta, de carácter comercial integrada del sector de petróleo y gas, que participa en todos los eslabones de la cadena de hidrocarburos: exploración, producción, transporte, refinación y comercialización.

Cuenta con dos refinerías en Barrancabermeja y Cartagena. A través de su filial Cenit, especializada en transporte y logística de hidrocarburos, es dueña de tres puertos para exportación e importación de combustibles y crudos en Coveñas (Sucre) y Cartagena (Bolívar) con salida al Atlántico, y Tumaco (Nariño) en el Pacífico. Cenit también es propietaria de la mayor parte de los oleoductos y poliductos del país que intercomunican los sistemas de producción con los grandes centros de consumo y los terminales marítimos. Ecopetrol también tiene participación en el negocio de los biocombustibles y presencia en Brasil, México y Estados Unidos (Golfo de México y Permian Texas).²⁹

2.4.2. Reseña histórica.

La historia de Ecopetrol se remonta a 1933, cuando se fundó la Compañía Colombiana de Petróleos (CCP) con el objetivo de explorar y explotar los recursos naturales del país. Durante los años 40, la empresa comenzó a operar en la producción de petróleo y gas, y en 1951, el gobierno colombiano nacionalizó la industria petrolera, convirtiendo a CCP en la principal compañía petrolera del país.

En los años 60, Ecopetrol comenzó a expandir sus operaciones más allá de Colombia, adquiriendo activos en otros países de América Latina. A medida que la demanda de petróleo aumentaba, la compañía también se expandió en la refinación, transporte y comercialización de petróleo y gas.

²⁹ Ecopetrol. Acerca de Ecopetrol (2021). [Online]. Disponible en <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/NuestraEmpresa/QuienesSomos/acerca-de-ecopetrol>

En el año 2000, Ecopetrol se convirtió en una empresa con una estructura corporativa moderna, con el objetivo de mejorar su competitividad y eficiencia en el mercado internacional. En 2007, se convirtió en una empresa pública, cotizando en la Bolsa de Valores de Colombia y en la Bolsa de Nueva York.

En los últimos años, Ecopetrol ha invertido en la exploración y producción de petróleo y gas en el Golfo de México, Brasil y Perú, y se ha convertido en uno de los principales productores de petróleo y gas de América Latina.

En resumen, la historia de Ecopetrol es una historia de crecimiento y expansión, desde sus inicios como una pequeña compañía de exploración hasta convertirse en una de las principales empresas energéticas de América Latina.

2.4.3. Gerencia de Operaciones de Desarrollo y Producción Piedemonte de Ecopetrol S.A.

La Gerencia de Operaciones de Desarrollo y Producción de Ecopetrol S.A. es una división de la empresa encargada de la gestión de las operaciones de exploración, producción, desarrollo y mantenimiento de los campos Cusiana, Cupiagua y Floreña.

La gerencia es responsable de dirigir y coordinar las actividades relacionadas con la producción de petróleo y gas en el campo, con el objetivo de maximizar la producción y la rentabilidad, y garantizar el cumplimiento de las normas y regulaciones de seguridad, medio ambiente y cumplimiento.

La gerencia también se encarga de la planificación y ejecución de proyectos de desarrollo y expansión del campo, así como de la gestión de los recursos humanos y los equipos necesarios para llevar a cabo las operaciones.

Es una de las áreas de mayor importancia para Ecopetrol, ya que sus tres campos Cusiana, Cupiagua y Floreña representan la mayor parte del suministro de gas

natural para el país tanto a nivel residencial como industrial y tiene un gran impacto en la economía colombiana.

2.4.4. Instalaciones del centro de producción, CPF Cusiana.

El campo Cusiana, o Centro de Facilidades de Producción (CPF) de Cusiana, se encuentra ubicado en el municipio de Tauramena, departamento de Casanare, en el piedemonte Llanero, en una de las riberas del río Cusiana, a 418 m.s.n.m, la temperatura de la zona es de alrededor de los 30°C, a unos 290 km de la capital de Colombia. En la Figura 6 se presenta una vista panorámica de las instalaciones del campo Cusiana de Ecopetrol.

Figura 6. Instalaciones del CPF Cusiana Ecopetrol S.A.



Nota: elaboración propia.

El campo Cusiana actualmente tiene una producción promedio de barriles equivalentes de petróleo día (BEPD) de 50333 de los cuales 46822 corresponden a gas ventas y

GLP³⁰. En el CPF Cusiana se adelanta el tratamiento del petróleo, se retira el agua y el gas con el fin de cumplir las especificaciones de calidad exigidas por el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural, RUT.

Debido a la pérdida de potencia de los pozos productores, en el campo Cusiana, se utilizan sistemas de reinyección de gas y agua producida con el objetivo de mantener la presión en el yacimiento e impulsar el petróleo para que fluya hacia la superficie.

2.4.5. Recibo de crudo

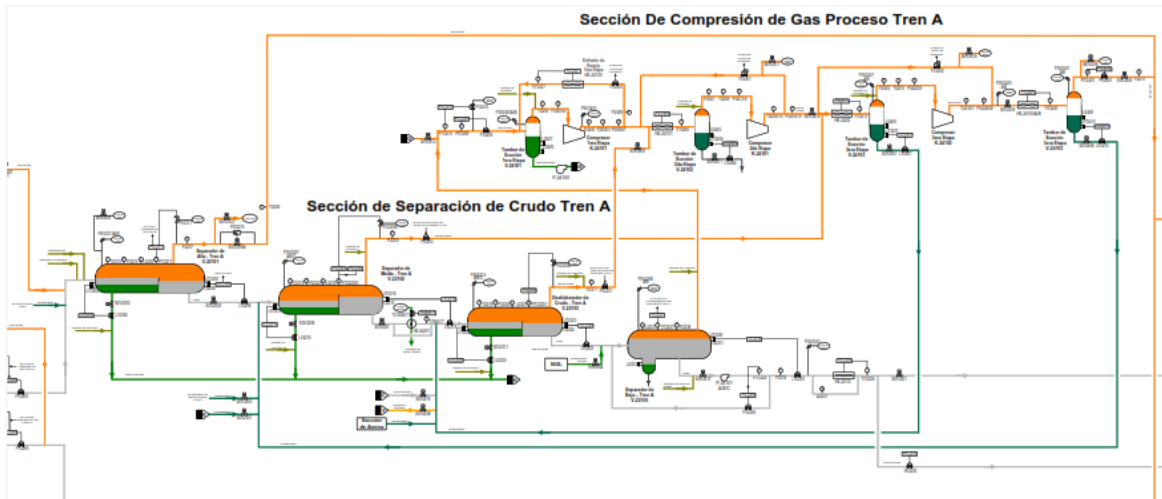
Este proceso se realiza en el *Slug Catcher*, en donde se estabilizan las presiones de las diferentes troncales de producción que transportan el crudo desde el yacimiento hacia el CPF Cusiana. El crudo que llega del yacimiento ingresa a vasijas separadoras en donde se separan el agua, el crudo y el gas para ser tratado de forma independiente.

El crudo desprende vapor de gas a presión atmosférica, se incrementa la presión con la ayuda de ventiladores y se entregan a la succión del compresor Demag Delaval para iniciar el proceso del gas natural. El gas se comprime por etapas: en la primera etapa se recuperan vapores en la unidad VRU y en la segunda se incrementa la presión mediante un compresor centrífugo de tres etapas, acoplado a un motor eléctrico de 4500 HP. La temperatura se controla con aerofriadores interetápicos.

En la Figura 7 se presenta el diagrama de las facilidades que se mencionan arriba, para el recibo del crudo.

³⁰ Ecopetrol (2021). Informe Departamento de Producción CPF Cusiana Ecopetrol S.A. Copia en posesión del autor.

Figura 7. Sección de recibo de crudo

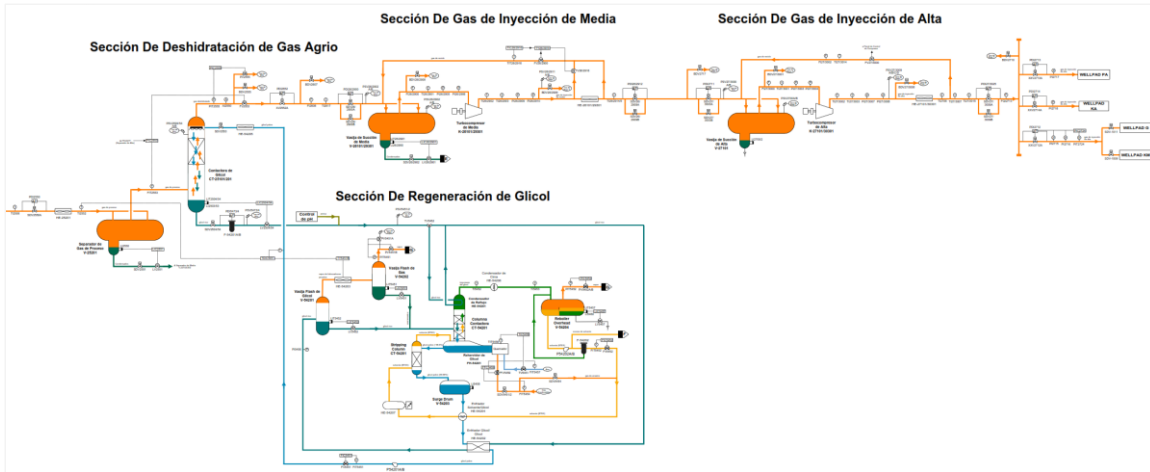


Nota: Extractado del Diagrama Grande de Control del CPF Cusiana. DGC-CCF-001.

Una vez separado, el gas se reúne en cabezales de gas de la misma presión, iniciando el proceso de compresión de media y alta presión; el gas que se comprime a media presión (gas dulce) es enviado a gas ventas y el resto de gas (gas agrio) se comprime a alta presión y es reinyectado al yacimiento.

El CPF Cusiana cuenta con tres trenes de reinyección de gas con turbocompresores. En la Figura 8 se presenta el diagrama de la sección de inyección de gas agrio, o de alta presión.

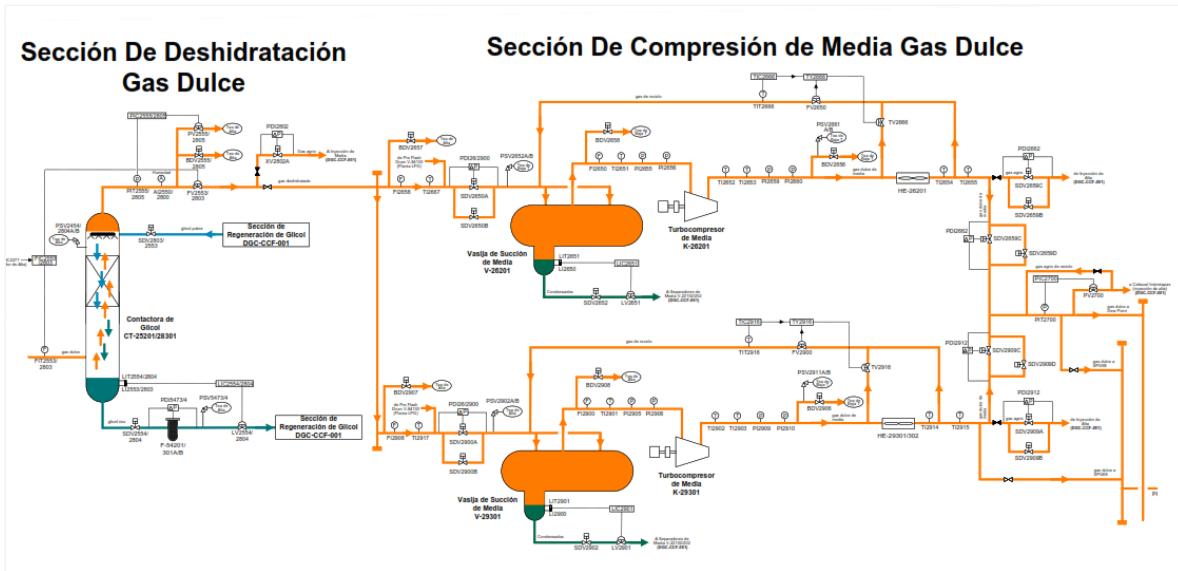
Figura 8. Sección de reinyección de gas agrio



Nota: Extractado del Diagrama Grande de Control del CPF Cusiana. DGC-CCF-001.

La sección de compresión de gas de presión media, o gas dulce, es ilustrada en la Figura 9.

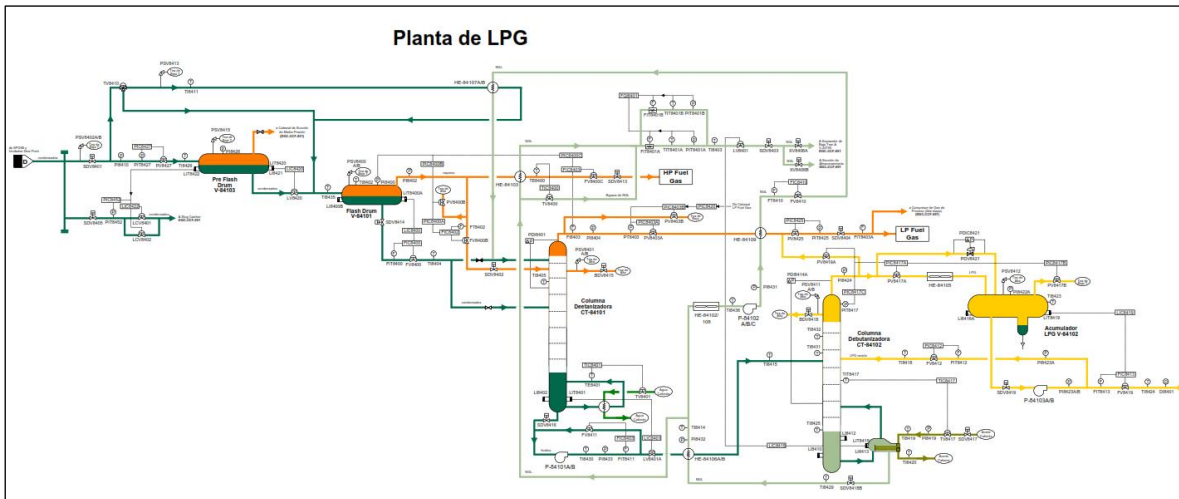
Figura 9. Sección de compresión de gas dulce



Nota: Extractado del Diagrama Grande de Control del CPF Cusiana. DGC-CCF-001.

Los condensados que resultan del proceso del gas se tratan y se almacenan en balas de Gas Licuado de Petróleo GLP, que son cargadas en cisternas para su comercialización, en un área de las instalaciones que se conoce como el Llenadero, cuyo diagrama se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Sección Planta GLP



Nota: Extractado del Diagrama Grande de Control del CPF Cusiana. DGC-CCF-001.

3. METODOLOGÍA

Para la recopilación de la información se utilizará el software de la empresa propietaria del equipo y responsable de su mantenimiento; ese software permitirá realizar la descarga de los históricos de falla reportados por parte del área de operaciones en la base de datos.

Para el análisis de esa información, la misma se organizará de forma que permita seguir la técnica propia de la metodología FMEA.

Esta metodología se considera cuantitativa, dado que se basa en cifras numéricas que reflejan la situación de las válvulas y permiten establecer un resultado que se reflejará en el procedimiento operativo que se deberá seguir para minimizar las fallas de las válvulas de compuerta de la línea de succión del compresor centrífugo.

En la Tabla 5 se describe el procedimiento seguido para el desarrollo de cada uno de los objetivos del trabajo.

Tabla 5. Procedimiento para el desarrollo de cada objetivo

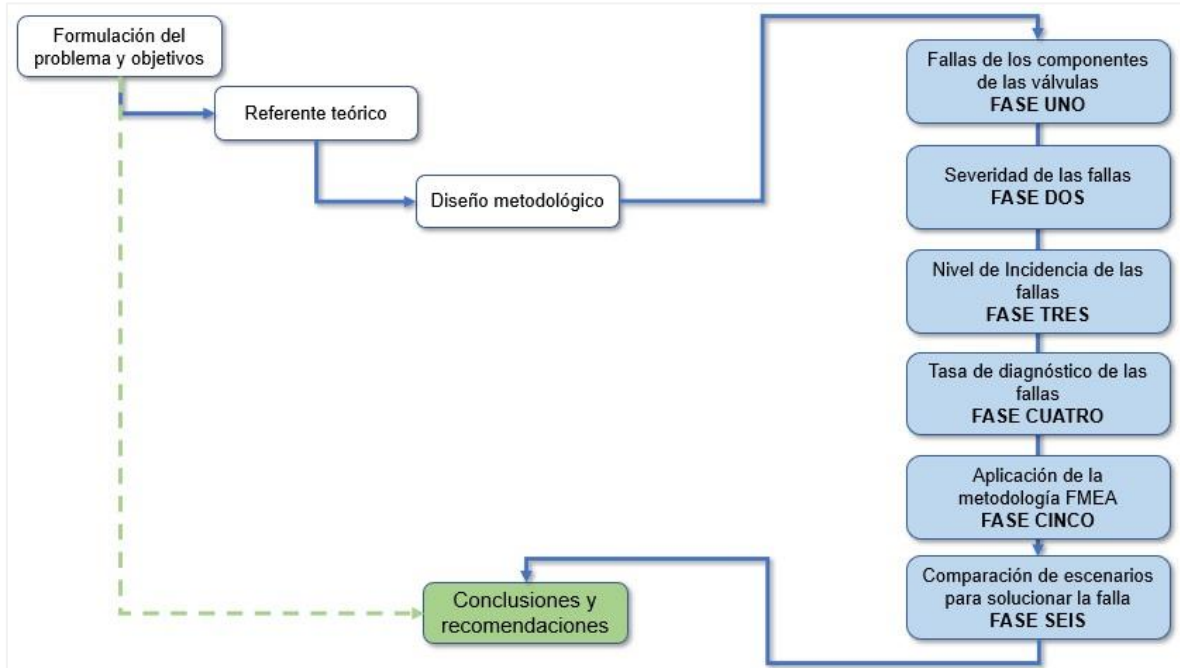
Numeral	Objetivo	Procedimiento
1	Obtener la información relacionada con las fallas que presentan las válvulas objeto de análisis	Se realizó una inspección visual de los componentes de las válvulas y el registro de las imágenes correspondientes para identificar el tipo de fallas de cada uno.
2	Caracterizar la severidad de las fallas de las válvulas de acuerdo con su impacto en la operación del sistema.	De acuerdo con lo reportado por los responsables de la operación y mantenimiento de las válvulas, se registraron características como la previsión de las fallas y sus síntomas.
3	Determinar el nivel de incidencia de las fallas de las válvulas de acuerdo con los efectos que causan en la disponibilidad del sistema.	De acuerdo con lo reportado por los responsables de la operación y mantenimiento de las válvulas, se establecieron las consecuencias que tienen las fallas que usualmente presentan las válvulas.

Numeral	Objetivo	Procedimiento
4	Establecer la tasa de diagnóstico de las fallas según la experiencia de los responsables de la operación y el mantenimiento de las válvulas.	Con base en la descripción hecha por los responsables de la operación y mantenimiento de las válvulas, se estableció si las fallas son repetitivas, esporádicas y/o previsibles.
5	Aplicar metodología FMEA a la operación de válvulas 20"x1500 instaladas en línea de succión de compresores centrífugos.	Se siguió el método FMEA mediante el cálculo de la severidad, la frecuencia y la tasa de detección.
6	Minimización de las fallas	Se compararon tres posibles escenarios de operación de las válvulas a los que se les aplicó la metodología FMEA.

Nota: elaboración propia.

El desarrollo de los objetivos requirió en total de seis fases, como lo muestra la Figura 11.

Figura 11. Fases de la investigación



Nota: elaboración propia.

Como lo ilustra esta Figura 11, el desarrollo de los objetivos se basó en el referente teórico previamente desarrollado, así como las conclusiones se formularon en función de los objetivos, lo que permitió dar respuesta a la pregunta de investigación que se planteó cuando se inició el proceso de investigación.

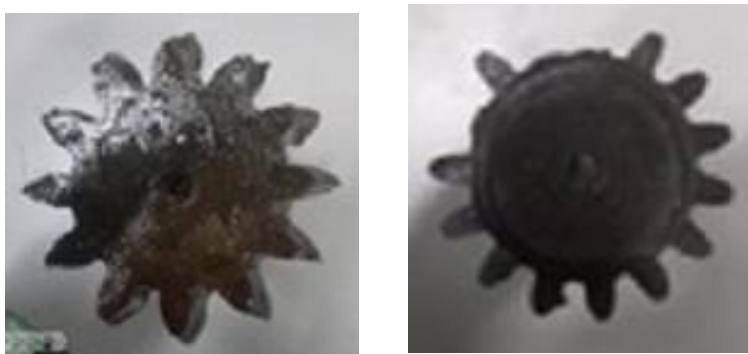
4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Siguiendo la metodología prevista, en este capítulo se presentan y analizan los resultados de la investigación, empezando por el primero de ellos, que corresponde a la descripción de las fallas que presentan los diferentes componentes de las válvulas.

4.1. FALLAS QUE PRESENTAN LAS VÁLVULAS

Las válvulas presentan diferentes tipos de daños; en primer lugar, se presentan daños en los engranajes, como lo ilustra la Figura 12.

Figura 12. Daño en los engranajes de las válvulas



Nota: elaboración propia

Como se observa en la Figura 12, los engranajes de las válvulas presentan un acelerado desgaste tanto en el metal mismo, como en sus dientes. El metal se desgasta en su superficie, lo que produce corrosión y deterioro de las propiedades físicas y metalúrgicas; así mismo, los dientes se parten de raíz, debido al desgaste que experimentan. Este tipo de fallas puede ser síntoma de que el esfuerzo que soportan estos engranajes es superior a sus especificaciones de diseño.

Adicionalmente, las válvulas también presentan desgaste en los alojamientos de los rodamientos, tal como se observa en la Figura 13.

Figura 13. Deterioro de los alojamientos de los rodamientos



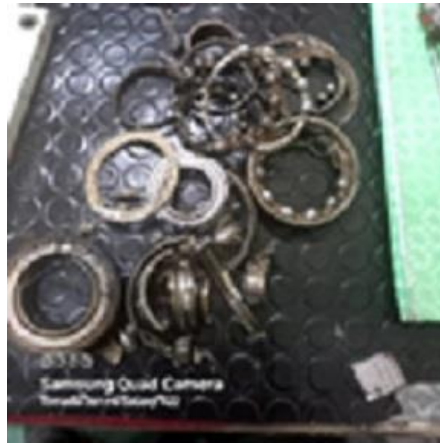
Nota: elaboración propia

En la fotografía de la Figura 13 se puede notar que los orificios de las válvulas en los que se alojan los rodamientos presentan deformaciones que se deben a que las fuerzas que soportan dichos rodamientos y que son transmitidos por los ejes de las válvulas, son superiores a las previstas. Esa situación explica la intensidad del ruido que se produce cuando se accionan las válvulas, dado que los rodamientos terminan desintegrándose al verse sometidos a fuerzas muy superiores a las que corresponden a sus dimensiones y especificaciones generales de diseño.

Como consecuencia de esas condiciones de funcionamiento, los rodamientos de las válvulas se deterioran de forma acelerada y total, como puede observarse en la Figura 14.

Tanto las canastillas, como las pistas y los sellos de los rodamientos se dañan, los rodamientos en general se desarman dentro de las válvulas y las esferas se salen, por lo que estos elementos dejan de cumplir la función para la cual son diseñados e instalados.

Figura 14. Daños de los rodamientos



Nota: elaboración propia

En efecto, en lugar de actuar como un componente que facilita el movimiento de las partes internas, las inapropiadas condiciones de funcionamiento llevan a que los rodamientos desintegrados se conviertan en obstáculos internos que impiden el normal movimiento de las válvulas, lo que genera recalentamiento, ruido y finalmente el bloqueo total de las mismas, después de que los dientes de los rodamientos se han quebrado y dejan de transmitir el movimiento de la forma prevista. La consecuencia final de las fallas previamente descritas es el deterioro de las roscas de los vástagos y de la tuerca sinfín, presentado en la Figura 15.

Figura 15. Vástago y tuerca sinfín dañados



Los vástagos y la tuerca sinfín se dañan debido a que el daño de los rodamientos y de los engranajes hace que operen en posición desalineada, lo que induce esfuerzos que no se consideran durante su diseño; además, las partes internas de los rodamientos actúan como obstáculo para el giro normal de estos componentes, según se describió antes.

4.2. SEVERIDAD DE LAS FALLAS DE LAS VÁLVULAS

El segundo objetivo del trabajo es la caracterización de la severidad de las fallas que presentan las válvulas; esa severidad muestra que se trata de un peligro que es preavisado por el ruido y el recalentamiento de los rodamientos; el efecto es de alta intensidad en la seguridad de las instalaciones, además que impide el cumplimiento de normas de seguridad como el aislamiento de los compresores.

4.3. NIVEL DE INCIDENCIA DE LAS FALLAS DE LAS VÁLVULAS

En cumplimiento del tercer objetivo se establece el nivel de incidencia de las fallas, con base los efectos que se ocasionan en la disponibilidad del sistema. Las fallas descritas hacen que las válvulas queden inoperativas, lo que deja al compresor fuera de servicio; a su vez, esa parálisis ocasiona pérdidas de producción debido a que el equipo no se encuentra disponible, además de que no se puede realizar el mantenimiento del correspondiente compresor debido a que las válvulas no se pueden cerrar para poder aislar ese equipo.

4.4. TASA DE DIAGNÓSTICO DE LAS FALLAS

El cuarto objetivo del trabajo consiste en establecer la tasa de diagnóstico de las fallas, en concordancia con la experiencia reportada por los responsables de su operación y mantenimiento.

Actualmente la falla ya está identificada, como quiera que se trata de una falla repetitiva, que ya se ha presentado en el pasado. Sin embargo, no se cuenta con una estrategia de diseño u operación que permita evitar la presentación de la falla, a pesar de que se sabe que las válvulas van a fallar mientras no se modifiquen las condiciones de operación.

4.5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA FMEA A LA OPERACIÓN DE VÁLVULAS

Continuando con los objetivos previstos, en este apartado se emplean la información previamente obtenida sobre las fallas que presentan las válvulas de compuerta de la línea de succión del compresor centrífugo, para el desarrollo de la metodología FMEA.

La aplicación de la metodología FMEA se hace utilizando la descripción realizada en el numeral 2.1.2 a las características de la falla que se hizo en los numerales 4.1 a 4.4.

Como se describió, la falla de las válvulas se caracteriza por impedir completamente su utilización e impedir el mantenimiento de los compresores. Eso hace que la severidad se clasifique como un efecto de alta severidad, que afecta la seguridad del personal de mantenimiento, por lo que se califica en la escala como 9.

En relación con la frecuencia de la falla, se trata de una falla permanente, por lo que el tiempo medio entre fallas es nulo. Esto hace que la calificación de la frecuencia sea máxima, de 10.

Por último, se califica la probabilidad de detección de la falla; los controles del sistema no evitan las posibles fallas, como quiera que el problema no se ocasiona por fallas de control. Cuando se presenta el ruido de la válvula lo que sucede realmente es que ya la válvula está dañada interiormente. Por esa razón, se califica en el nivel 9.

Los resultados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Cálculo del Número de Prioridad del Riesgo

Aspecto		Nivel	Valor
S	Severidad	Un efecto de alta intensidad en la seguridad del operador, la fábrica o el personal de mantenimiento o que no cumpla con las reglas estatales.	9
O	Frecuencia	Uno de cada 10 horas de operación tiempo medio entre fallas TMEF<1 hora	10
D	Detección	Rara vez los controles del sistema encuentran razones o casos de falla	9
S*O*D	Risk Priority Number-RPN		810

Nota: elaboración propia

Como se observa, el resultado de la aplicación de este método FMEA es de 810, lo que indica que es un nivel general alto, de más del 80% del máximo de 100.

Lo que debe seguir en la empresa para priorizar el mantenimiento que requieren las válvulas es la aplicación de este mismo criterio a los demás equipos de la planta, de manera que se pueda comparar este resultado al momento de definir las prioridades dentro de los programas de mantenimiento.

4.6. MINIMIZACIÓN DE LAS FALLAS

Con el propósito de darle una utilidad práctica al modelo FMEA desarrollado hasta este punto, a continuación, se evalúan las opciones disponibles para minimizar las fallas que presentan las válvulas, como se definió en el capítulo de metodología.

Para la lograr la minimización de las fallas debe tenerse en cuenta que, de acuerdo con la metodología FMEA previamente aplicada, la severidad de las fallas que presentan las válvulas de compuerta es alta, que dicha falla genera efectos permanentes y que los controles del sistema no evitan las posibles fallas porque no se trata de una falla ocasionada por los sistemas de control.

Tal como se describe en el planteamiento del problema que se presenta en la estación de bombeo, el mismo se debe a la alta velocidad de operación que se produce al utilizar la máquina hidráulica para operar las válvulas. Como allí se describe, el diseño de las válvulas está hecho para que sean operadas a baja velocidad, de manera manual.

Sin embargo, en el análisis de la operación de la estación se debe tener en cuenta que los esfuerzos internos que generan el daño de los componentes se ven afectados tanto por la velocidad de operación, como por la presión de la línea en la que están instaladas las válvulas. Esto quiere decir que es probable que se presenten dos situaciones:

1. Válvulas operando a alta velocidad y baja presión.
2. Válvulas operando a alta presión y baja velocidad.

La operación manual de las válvulas ya mostró que las mismas no se deterioran con tanta rapidez como cuando se operan hidráulicamente. Esto quiere decir que, hasta determinado punto, la situación 2 reduce los daños de las válvulas, por lo que pareciera ser más crítica la velocidad de operación que la presión. Sin embargo, la situación no ha sido probada plenamente, por lo que no se cuenta en la actualidad

con datos para comparar el coeficiente de riesgo RPN bajo esas condiciones con el que existe actualmente.

Si bien en la práctica la presión de la línea no se puede reducir para mejorar las condiciones de operación de la válvula, la importancia de conocer el coeficiente RPN bajo la condición 1 radica en el hecho de que, en el caso de que se logre reducir la ocurrencia de la falla cuando se modere la presión de operación, se habrá encontrado que no necesariamente se tiene que reducir la velocidad de operación de las válvulas para mejorar su desempeño, sino que ese mismo resultado se puede obtener mediante una modificación en el diseño interno de los componentes de manera que sean capaces de resistir la alta presión de operación de la línea.

Ahora bien, si el resultado de operar la válvula a alta velocidad y baja presión fuera el mismo que se presenta actualmente bajo alta presión y alta velocidad, querría decir que definitivamente el daño lo ocasiona la velocidad, independientemente de la presión. En esta segunda hipótesis, los cambios internos de la válvula se tendrían que hacer con miras a mejorar su resistencia a las altas velocidades de operación.

Existe un tercer escenario que es el de seguir operando las válvulas a baja velocidad, pero ya no manualmente sino mediante un accionamiento hidráulico. Como se describió en un principio, inicialmente las válvulas se operaban de forma manual y eso exigía dedicar varios operarios a esa labor por un tiempo prolongado; esa situación hace pensar que el problema de la operación manual no sea el tiempo que demora hacerlo, sino el hecho de que la fuerza que se requiere es muy intensa y prolongada en el tiempo.

Es decir que el procedimiento a seguir debe incluir tres escenarios:

1. Válvulas operando mediante un actuador hidráulico a alta velocidad y baja presión.
2. Válvulas operando manualmente a alta presión y baja velocidad.

3. Válvulas operando mediante un actuador hidráulico a alta presión y baja velocidad.

En la Tabla 7 se presenta las condiciones de velocidad, presión y modo de operación para esos tres escenarios.

Tabla 7. Escenarios de operación

Escenario	Velocidad	Presión	Operación
Actual	Alta	Alta	Hidráulica
Escenario 1	Alta	Baja	Hidráulica
Escenario 2	Baja	Alta	Manual
Escenario 3	Baja	Alta	Hidráulica

Nota: elaboración propia

El escenario 2 corresponde a la forma en que se operaban las válvulas originalmente en la estación, es decir, mediante operarios que la abrían y cerraban de forma manual, mientras que el escenario 1 y el escenario 3 no han sido probados.

4.7. PRUEBA DE LOS ESCENARIOS

Para realizar la prueba en el escenario 1 se necesita que la válvula no esté sometida a presión, por lo que puede requerir su desmontaje de la línea. Con el propósito de reducir el tiempo de la prueba sin tener que esperar hasta que se produzca una falla para poder calcular el coeficiente de riesgo RPN, se recomienda que se midan el ruido, las vibraciones y el calentamiento de la válvula durante la prueba, dado que esos factores pueden ser un indicio de que se están produciendo esfuerzos internos altos que podrían acelerar la presencia de fallas o daños de los componentes.

A su vez, para realizar la prueba en el escenario 3 se necesita instalar un actuador hidráulico de velocidad variable para la operación de la válvula. Esta prueba se debe

realizar sin necesidad de modificar la presión normal de operación de la línea de gas, por lo que puede resultar más sencilla que la prueba del escenario 1. En este escenario, se puede ir modificando de manera progresiva la velocidad del actuador hidráulico e ir midiendo las vibraciones, el ruido y la temperatura de la válvula, con el fin de detectar un nivel de velocidad que sea tolerable, es decir, que evite la aceleración de la falla de los componentes internos.

El escenario 3 ofrece la ventaja adicional de que no se realizan modificaciones a los componentes internos de la válvula y solamente se modifica su velocidad de operación.

Con base en las anteriores consideraciones, la recomendación es que se realicen pruebas en el escenario 3 y, una vez se encuentre el nivel de velocidad que no genere vibraciones, ruidos o calentamientos de los componentes de la válvula, se fije esa velocidad de operación del actuador hidráulico y se realicen pruebas de largo plazo para calcular el índice de riesgo RPN.

4.8. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FMEA

En este apartado se presentan de forma resumida los resultados de todas las fases que se siguieron para el desarrollo de los objetivos, de acuerdo con el análisis nodal de fallos y efectos, FMEA.

Tabla 8. Resultados de las diferentes fases de la investigación

Fase	Descripción	Resultado
1	Fallas típicas de los componentes	Se presentan de forma visual y se describen las fallas típicas de cada componente
2	Severidad de las fallas	Las fallas están precedidas por ruido y recalentamiento de los rodamientos debido a las fuerzas de fricción entre los componentes

Fase	Descripción	Resultado
3	Nivel de incidencia de las fallas	Cuando se presentan las fallas de los componentes, las válvulas quedan por fuera de operación
4	Tasa de diagnóstico de las fallas	Las fallas tienen carácter repetitivo y no se cuenta con una estrategia de diseño u operación que prevenga las fallas
5	Aplicación de la metodología FMEA	Severidad (S): 9 Frecuencia (O): 10 Detección (D): 9 RPN: 810
6	Comparación de escenarios para solucionar las fallas	Tres escenarios, además del actual. Se recomienda el escenario 3, de baja velocidad y alta presión, mediante operación hidráulica.

Nota: elaboración propia.

4.9. IMPACTO

El impacto más importante de la aplicación del escenario seleccionado, es decir, de operar las válvulas a baja velocidad, tanto en su apertura como en su cierre, y a alta presión, es el incremento de su disponibilidad y de su vida útil.

Como segundo beneficio está la reducción de costos tanto de operación como de mantenimiento, debido a que se requieren menos operarios para operarla y un mantenimiento menos frecuente, además de que se evita la destrucción de las partes internas que se presentaba anteriormente.

El costo de la mano de obra se detalla en la Tabla 9.

Tabla 9. Costo de la mano de obra para operación y mantenimiento de cada válvula

Acción	Horas hombre	Salario mensual	Con factor prestacional	Tarifa horaria	Costo total
Operación	1	\$4,640,000	\$6,264,000	\$32,625	\$32,625
Mantenimiento	90	\$4,640,000	\$6,264,000	\$32,625	\$2,936,250

Nota: elaboración propia

Es decir que cada vez que se necesite operar la válvula, el costo de la mano de obra es de \$32.625. El salario mensual de los operarios es de 4 salarios mínimos mensuales legales vigentes y el factor prestacional es de 35%. A lo anterior se debe agregar la tarifa de \$150.000 por hora que tiene el equipo hidráulico que se requiere para la operación a alta presión.

Al operar la válvula según el escenario seleccionado, se reduce la frecuencia de mantenimiento, que pasa de seis meses a dos años. Es decir que por concepto de mano de obra se reduce de acuerdo con las cifras que se muestran en la

Tabla 10. Costo anual de mano de obra para mantenimiento

Escenario	Costo mano de obra
Situación actual	\$5,872,500
Operación propuesta	\$1,468,125
Reducción anual por mano de obra mantenimiento	\$4,404,375

Nota: elaboración propia.

Ahora bien, el costo más importante corresponde a las piezas internas de las válvulas. En el escenario actual, esas piezas debían cambiarse cada dos años aproximadamente, mientras que en el escenario propuesto se espera que la vida útil de las válvulas sea de 20 años. El costo de esos componentes es de \$27'500.000, de acuerdo con la información suministrada por la empresa.

La sumatoria de costos de mano de obra y de los kits de recambio para los dos escenarios se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Comparación de costos en 20 años

Concepto	Situación actual	Situación propuesta	Diferencia total
Número de recambios en 20 años	10	1	
Costo de los repuestos de recambio	\$275,000,000	\$27,500,000	
Costo anual mano de obra de mantenimiento	\$5,872,500	\$1,468,125	
Total mano de obra de mantenimientos en 10 años	\$58,725,000	\$14,681,250	
Total mano de obra y kits de recambio	\$333,725,000	\$42,181,250	\$291,543,750

Nota: elaboración propia

De acuerdo con estas cifras, en lo que tiene que ver con los costos el escenario de operación propuesto genera una reducción de \$291'543.750 en veinte años; este cálculo está hecho con costos tomados a valor presente, es decir, sin tener en cuenta la inflación ni la devaluación del peso frente al dólar, que afectan a la mano de obra y a los repuestos, respectivamente.

4.10. ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento que requieren las válvulas consiste en verificar semanalmente su correcta operación y lubricar todas sus partes internas cada dos años, siguiendo las acciones que se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12. Actividades de mantenimiento de las válvulas

Parte / componente	Tarea de mantenimiento	Duración [hrs]	Grupo a cargo	Frecuencia. (días)
Mecanismos, rodamientos, bujes, tuercas de actuador mecánico. Empaques y sellos de la válvula, componentes internos: disco-esfera- asientos-resortes-carcaza, vástago, bonete	Identificar deterioro, fugas, pase interno y operatividad selectivas según requerimiento de operaciones. Verificar nivel de ruido en su operación, vibraciones o calentamiento.	0.5	Operadores	7
	<p>Lubricación: Lubricación y engrase gear box. Inspección. Inspección, drenaje de líquidos y lubricación por graseras. Inyectar grasa a los asientos a través de las graseras localizadas en el cuerpo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalar grasera de seguridad a los asientos. • Aumentar presión en el equipo de engrase hasta que la presión iguale la presión de la línea. • Inyectar grasa. • Desmontar equipo inyector de grasa. • Verificar hermeticidad de la grasera original. • Desmontar grasera de seguridad en caso de que la grasera original este en buen estado. De lo contrario dejarla instalada. <p>Lubricación Gear Box y cambio de empaques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Asegure la válvula en la posición abierta o cerrada que deba quedar • Retire la tapa indicadora de posición. • Retire la tapa del Gear Box o Caja de engranajes • Retire la grasa y depósitos que encuentre dentro de la caja usando lubricante penetrante, verifique si encuentra partes sólidas metálicas, lo que indicará fractura de algún componente. 	90 (Este tiempo varía según el sistema y la cantidad de válvulas)	Departamento de mantenimiento	730

Parte / componente	Tarea de mantenimiento	Duración [hrs]	Grupo a cargo	Frecuencia. (días)
	<ul style="list-style-type: none"> • Verifique el estado de los componentes y regístrelo. • Lubrique con grasa multipropósito todas las superficies dejando los engranajes cubiertos a máximo un 50% de la cavidad. • Limpie la superficie de sellado de la tapa, aplique un cordón de silicona para alta temperatura uniforme como empaque de la tapa. • Instale la tapa y ajuste todos los tornillos. • Si existe algún componente con falla regístrelo para solicitar el repuesto y programar el mantenimiento correctivo • Inyectar grasa a los asientos a través de las graseras localizadas en el cuerpo • Reportar fallas. 			

Nota: elaboración propia

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

El trabajo que se llevó a cabo con la presente investigación aporta al desarrollo y uso de técnicas novedosas para detectar y ubicar las fallas que pueden estar presentando esta clase de sistemas complejos, a fin de que se vean expuestos a menos vulnerabilidades y buscar que tengan un menor nivel de poder llegar a fallar. Se debe señalar, además, que para la realización de este estudio se tuvo en cuenta el desarrollo de todos los objetivos que lo conformaron.

5.1.1. Primer objetivo.

Frente al primer objetivo formulado, se debe recalcar que se contó con la información requerida y relacionada con las fallas que presentan las válvulas de compuerta de la línea de succión de los compresores, dicha información se encuentra contenida en el software de la empresa dueña del equipo y quien es la encargada de su mantenimiento. De dicho software se extractaron los datos técnicos, e igualmente, se conoció tanto la estructura tecnológica como el funcionamiento y operación, así como la problemática que presenta el actuador mecánico de dichas válvulas.

De esta información, se puede observar que el tipo de mantenimiento llevado a cabo a las válvulas es preventivo y es realizado cada dos meses.

5.1.2. Segundo objetivo.

Posteriormente para el desarrollo del segundo objetivo planteado referente a la caracterización de la severidad de las fallas en estas válvulas con base en la información recopilada, se denota que dichas fallas conforman un riesgo que ya ha sido advertido con antelación tanto por el ruido generado como por el recalentamiento que se produce en los rodamientos. Para lo cual se aplicó la

metodología FMEA, y según el objetivo planteado dentro de esta investigación se concluye que con relación a la severidad de la clase de fallo presentada en la válvula del compresor, está categorizado con un efecto de severidad elevada, generando repercusiones en la seguridad del personal que se encarga del mantenimiento y obteniendo una valoración en la escala de 9, siendo la severidad de las fallas en estas válvulas de compuerta con un nivel bastante elevado superior al 80%; situación que se define porque se conoce que la falla se viene presentando de forma repetitiva.

5.1.3. Tercer objetivo.

En cuanto al desarrollo del tercer objetivo que hace alusión al nivel de incidencia de las fallas presentadas en dichas válvulas, se puede observar que con el estudio y aplicación del análisis efectuado con la metodología FMEA, a través de la cual se conocieron las funciones que cumplen estas válvulas, se determinó que esta clase de fallas provocan que las válvulas no se puedan operar, y esto a su vez, genera que el compresor no se pueda utilizar; por ende, ese punto muerto operativo genera pérdidas en la producción, a causa de la falla en el compresor, al cual, tampoco se le puede efectuar el respectivo mantenimiento, puesto que a causa del daño en las válvulas, éstas no se puedan cerrar para de incomunicar el equipo a fin de hacerle la reparación correspondiente. Por lo tanto, se determina que la frecuencia de la falla es constante, y, de acuerdo con la guía sugerida del nivel de frecuencia de ocurrencia de la falla del tiempo medio entre fallas, no se da, es decir, es nulo. Por lo tanto, la frecuencia del nivel de incidencia es el máximo y cuyo tope es de 10, según lo señala la tabla guía No. 5.

5.1.4. Cuarto objetivo.

En cuanto al cuarto objetivo que hace alusión a establecer la tasa de diagnóstico de las fallas, se debe señalar que de acuerdo con la implementación de la metodología FMEA y estudiando todo el monitoreo efectuado a las válvulas de succión del

compresor, se puede observar que es una falla que ya ha sido detectada debido a que se presenta de forma reiterativa. Aunque, también se puede determinar que no se posee una táctica de diseño u operación del mecanismo que posibilite eludir que la falla surja, aunque se conoce que las válvulas continuarán fallando si no se transforman las condiciones operativas del sistema.

Dentro de los inconvenientes fundamentales que se detectaron a través del monitoreo o diagnóstico realizado, se encuentra el hecho de que únicamente se cuenta con la información registrada en el software único sistema de almacenamiento de datos, los cuales no son óptimos para efectuar un estudio de confiabilidad que permita tomar determinaciones y posibilite elevar la eficacia operativa, es decir, no se cuenta con un historial de fallas detallado. Frente a lo cual, cabe resaltar que se debe continuar efectuando este monitoreo que permitirá ir afianzando los resultados en el estudio efectuado a las válvulas de succión, el cual es esencial puesto que cumplen una función fundamental, ya que de su operatividad depende el rendimiento en los compresores; y además también se conoce que la causa principal de paradas del equipo que no son programadas se generan por las válvulas de succión, por lo tanto, es fundamental monitorearlas para evitar las fallas.

Teniendo en cuenta el procedimiento aplicado a través de la metodología FMEA como precedente de estudio de las fallas en cuanto a la confiabilidad que puede tener el mecanismo de las válvulas; estos equipos se desempeñan mientras dure su operación por el tiempo estimado, operación que se encuentra dentro de los parámetros de la forma como se diseñaron estas válvulas y considerando las condiciones de operatividad a las que se encuentran sometidas.

Para poder conseguir el diagnóstico de esta clase de fallas, los datos se fundamentan en conocer cuál es el criterio de diseño de las válvulas, además de considerar el material del cual está hecho, se debe conocer el material desde su proceso de fabricación a fin de que cumpla con los requerimientos técnicos exigidos;

esto posibilitará determinar la clase de técnica de mantenimiento que se debe aplicar para poder de esta forma, definir el motivo por el cual se presentó la falla.

Contando con el conocimiento de toda esta información técnica, se puede llegar a conseguir una evaluación proporcionada por el personal encargado de la operación, así como los reportes e informes de mantenimiento que deben ser frecuentes a fin de aplicar los mejores procesos requeridos de mantenimiento, ya que al tomar una evaluación técnica de estas válvulas permite ver a profundidad el estado de éstas, para poder determinar si se está generando una falla, y conocer de esta forma en qué momento y bajo qué condiciones se presenta dicha falla.

Se debe aplicar esta herramienta o técnica de diagnóstico durante toda la vida útil de la válvula a fin de mantener un estándar y en un estado óptimo el compresor, puesto que al trabajar en óptimas condiciones, se presentarían menos fallas y menos desgaste en estas piezas, considerando que en este punto del diagnóstico es esencial contar con los parámetros operativos del sistema, a fin de conocer lo que está sucediendo con la máquina para determinar el momento de mejor funcionamiento del equipo, y así poder aplicar una técnica de mantenimiento apropiada, y que las paradas que se le tengan que hacer a éstos sean solo a nivel técnico.

5.1.5. Quinto objetivo.

Por otra parte, y con relación al quinto objetivo que señala la aplicación de la metodología FMEA para la operación de dichas válvulas, cabe manifestar que esta metodología se efectuó según se señala en el numeral 4.5 aplicando la descripción de este proceso, la cual se realizó en el numeral 2.1.2 a todas las particularidades que tiene la falla de las válvulas la cual se detalló entre los numerales 4.1 a 4.4. de la investigación.

De esta forma, a través de los análisis de fallos en mantenimiento con la metodología FMEA se plasmaron y estructuraron dichas fallas y se dictaminaron las conclusiones observadas, las cuales deben quedar registradas en informes que generen obligaciones tanto para los integrantes del grupo de mantenimiento como para el director encargado de éstos, para reflejar de forma estricta y auditable todos los planteamientos relacionados con el problema o falla.

La metodología FMEA aplicada, simboliza un mecanismo apropiado donde se resume la experiencia que tiene el personal de mantenimiento de este sistema operativo. Del estudio efectuado a través de esta metodología se reconocen los puntos críticos del problema, los cuales surgen a causa de que se realiza mantenimiento únicamente cada dos meses a dichos equipos. Los resultados alcanzados a través de la investigación brindan una perspectiva amplia sobre la trascendencia que tiene la aplicación de este método, el cual posibilitó cumplir con los objetivos señalados anteriormente.

Después de haber efectuado la investigación, se puede señalar que el mantenimiento actual no es el apropiado para estos equipos, por lo cual se sugiere diseñar un plan de mantenimiento que esté acorde a éstos y que abarquen labores de mantenimiento requeridas que minimicen los mantenimientos correctivos para que se incrementen la eficiencia de los equipos.

Teniendo en cuenta el FMEA y según el formato que se aplicó en la empresa, se sugirieron una serie de recomendaciones que se señalan a continuación.

5.1.6. Impacto.

Con posterioridad al desarrollo de los objetivos del trabajo se adelantó un análisis del impacto de la opción seleccionada en el escenario 3. De acuerdo con ese análisis, el principal impacto corresponde al incremento en la disponibilidad de las válvulas, debido a que se evita su deterioro acelerado. También se estableció el

impacto económico por la reducción de la frecuencia de las actividades de mantenimiento; esa reducción genera para la empresa una reducción de \$291'543.750 en 20 años.

5.1.7. Actividades de mantenimiento.

Igualmente se presentó una descripción detallada de las actividades de mantenimiento que requieren las válvulas, así como la frecuencia de dichos mantenimientos.

5.2. RECOMENDACIONES

Dentro de las recomendaciones que se pueden plantear para ser analizadas y puestas en práctica, están las que se señalan a continuación.

- Coordinar con el personal encargado de mantenimiento, realizar inspecciones de rutina con una mayor frecuencia tanto a las válvulas como a los compresores, y de estas inspecciones realizar las respectivas anotaciones y parámetros de funcionamiento que han sido observados, lo cual posibilitará contar con un seguimiento más detallado y ordenado del funcionamiento de todo el sistema.
- Realizar más capacitaciones a todo el personal encargado del mantenimiento sobre todos los principios básicos, agregándole diversos casos de análisis y prácticas con el fin de que puedan estimar la forma en que la teoría está acorde con la práctica, igualmente efectuar capacitaciones a nivel técnico buscando que se encuentren en condiciones para efectuar de manera apropiada las labores correspondientes al mantenimiento, bien sea a nivel predictivo, preventivo o correctivo.
- Buscar crear un estudio al presupuesto de mantenimiento fundamentado en un nuevo plan para este propósito con base en los costos que generan las reposiciones de componentes a causa de la frecuencia en el mantenimiento,

a fin de buscar hacerle frente a las condiciones correctivas generadas por los modos de fallas críticas.

- Se recomienda desarrollar e implementar un nuevo plan de mantenimiento conformado por labores tanto predictivas como preventivas fundamentado en un estudio de modos de fallas y efectos FMEA a fin de que se reduzcan los mantenimientos correctivos, ya que éstos casi siempre requieren que se reemplacen materiales que van a encarecer el costo del mantenimiento. Con la implementación de este plan de mantenimiento, se puede lograr el total control de las operaciones de mantenimiento efectuadas, así como el control de los recursos posibilitando la optimización de la gestión de mantenimiento en cuanto a repuestos y materiales, ya que a través de un sistema eficaz de operación y control en cuanto a las acciones de mantenimiento es la base esencial de una robusta administración en mantenimiento; por lo tanto, es esencial llevar un formato de control de estas acciones que muestren el historial de los equipos a los cuales se les ha efectuado el mantenimiento.
- Los planes de mantenimiento tanto rutinario, programado y preventivo se deben implementar y no se deben dejar de realizar, puesto que constituyen los principios básicos del mantenimiento que son: Planear, hacer, verificar y actuar en consecuencia; y para poder alcanzar este propósito se requiere capacitar y mantener actualizado al personal.
- La metodología FMEA se debe efectuar con anterioridad a que se perciba o se detecte una falla potencial en las válvulas y/o en todo el proceso, ya que esto posibilita minimizar el riesgo de poner en marcha cambios a nivel correctivo, los cuales pueden llegar a genera más complicaciones.
- A fin de que no se presenten diversas problemáticas cuando se va a escoger el sistema de mayor criticidad dentro de la empresa al cual se le requiera practicar la metodología, se sugiere contar con el histórico de fallas, lo cual posibilita saber cuales se repiten más y generan mayor pérdida productiva, para llevar un registro adecuado de los trabajos efectuados tanto en las

válvulas como en los compresores con todos los datos y valoraciones, con el propósito de detectar cualquier irregularidad en el funcionamiento y así tomar alguna medida que permita mejorar la eficiencia en el trabajo que realiza el compresor.

- Se recomienda utilizar la metodología FMEA para los sistemas de mayor criticidad dentro de la empresa y así minimizar el riesgo de que se presente una paralización en la producción para poder contar con un óptimo control dentro de los equipos de la empresa. Así mismo, se sugiere minimizar el riesgo inaceptable de todo el sistema motocompresor.

BIBLIOGRAFÍA

- ALFARO Alexandra, YAYA Javier, CHUCUYA Roberto. "Implementación del Mantenimiento Productivo Total en la mejora de la productividad y mantenibilidad del proceso de harina de pescado". *INGnosis Revista de Investigación Científica* 5, no. 2, 2019, pp. 126-138.
- AMAYA Alejandro, PEÑALOZA Marieth, CÉSPEDES Jesús. "Modelo para el mantenimiento de equipos automatizados en mecanizo CNC del sector metalmecánico colombiano". *Aglala* 10, no. 1, 2019, pp. 269-296.
- ANDRADE, D. Análisis de la seguridad energética en la cadena de suministro del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2019.
- BATTIROLA Julio Cesar, PIECHNICKI Flávio, Rocha Eduardo, PORTELA Eduardo. "Process-aware FMEA framework for failure analysis in maintenance". *Journal of Manufacturing Technology Management*, Sao Paulo, 2017.
- CALVO, C. Técnica de gamma scanning para el diagnóstico en operación, de equipos de refinación de petróleo y gas natural. *Perfiles de Ingeniería*, 16(16), 2020, pp. 65-75.
- CARO, Cristian. Desarrollo de una estrategia de mantenimiento basada en análisis de riesgo y confiabilidad para atracciones mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Mecánica, Bogotá, UNAD, 2019.
- CERVANTES Marcial, PALI Ramón, ZAVALA José. "Aplicabilidad de la criticidad en el mantenimiento de equipos". *Project Design and Management* 1, 2019.
- CORREDOR, G. Colombia y la transición energética. *Ciencia política*, 13(25), 2018, pp. 107-125.

- DA SILVA Gisele, GARCIA José, CHIARI Ethel. "Limitações da ferramenta FMEA: estudo de suas aplicações em uma empresa do segmento automotivo". Revista Brasileira Multidisciplinar 20, no. 2, 2017, pp. 69-79.
- FILZ Marc, BERNHARD Jonas, HERRMANN Christoph, THIEDE Sebastian. "Data-driven failure mode and effect analysis (FMEA) to enhance maintenance planning". Computers in Industry 129, 2021, pp. 103-134
- FIGUEROA CAMPA, J. Aumento de confiabilidad y eficiencia en departamento de diseño de producción de una empresa productora de arneses. Sonora, 2021. Universidad de Sonora.
- GARCÍA Judit y GARCÍA Jesús. "La eficacia instruccional de dos enfoques virtuales: procesos y producto". Revista de Psicodidáctica 23, no. 2, 2018, pp. 117-127.
- GARCÍA, Mario. "Una polémica trascendental sobre el mantenimiento Preventivo y Predictivo". Revista Investigaciones Sociales 3, no. 8, 2017, pp. 1-11.
- GRUSZKA Józef y MISZTAL Agnieszka. "The new IATF 16949: 2016 standard in the automotive supply chain". Research in logistics & production, 2017, pp. 7-17.
- GUDYNAS, E. Los nudos del petróleo en Colombia: ambiente y ciencia, política y democracia. Palabras al margen, 2018, pp. 122, 22-31.
- HÉRNANDEZ, C. Propuesta de proceso de cambio socio-técnico en una empresa de acumuladores de energía para la producción de acumulares de ion-litio. Cali, 2019. Universidad del Valle.
- LAGOS, Carlos. "Un modelo de optimización dinámica para la planificación eficiente de tareas de mantenimiento de aviones", Santiago de Chile, Universidad de Chile, 2019.

- MAYORGA Alex y QUISHPE Jeverson. Deontología aplicada al mantenimiento de maquinaria industrial por ingenieros mecánicos. Buenos Aires, Universidad Nacional de La Plata, 2019.
- MEDENOU Daton, LATIF Fagbemi, ROLAND Houessouvo, Thierry Jossou, MÊTOWANOU Ahouandjinou. "Medical devices in sub-Saharan Africa: optimal assistance via a computerized maintenance management system (CMMS) in Benin". Health and Technology 9, no. 3, 2019, pp. 219-232.
- PÉREZ, Jesús. Propuesta de mantenimiento centrado en confiabilidad en el área de reacción PROQUIVER, SA DE CV. Universidad Veracruzana, México, 2018.
- PERRY, G. El petróleo en la economía colombiana. Bogotá 2019, Fedesarrollo.
- SHHRABI Mahmood y ABBAS Amir. "Application of FMEA and AHP in Lean Maintenance". International Journal of Modern Engineering Sciences 3, 2014, pp. 61-73.
- SRIVASTAVA P, KHANDUJA D, AGRAWAL V. Mitigation of risk using rule based fuzzy FMEA approach. 8th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence), 2018, pp. 26-30.
- VILLARINI M., CESAROTTI V., ALFONSI L., INTRONA, V. Optimization of photovoltaic maintenance plan by means of a FMEA approach based on real data. Energy Conversion and Management, 152, 2017, pp. 1-12.