

DESARROLLO DE MODELO ESTRATEGICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN (CBM) EN EL SECTOR DE
PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO

MAIRA ALEJANDRA MURILLO ARIZA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2018

DESARROLLO DE MODELO ESTRATEGICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN (CBM) EN EL SECTOR DE
PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO

MAIRA ALEJANDRA MURILLO ARIZA

Monografía de grado presentada como requisito para optar el título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

MANUEL DARÍO MARTÍNEZ CARVAJAL
Ingeniero Electromecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

*A Dios por bendecirme con este logro.
A mi Familia, mi esposo y mi hija por su amor y apoyo incondicional
para alcanzar esta meta.*

Maira Alejandra Murillo Ariza

AGRADECIMIENTOS

Al cuerpo docente de Ingenieros de la Especialización en Gerencia de Mantenimiento, por los conocimientos y experiencias impartidas.

Al Ingeniero Alain Morales Restrepo, por su especial respaldo y soporte con su conocimiento y experiencia como especialista en el área de monitoreo de condición.

La Autora

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. CONTEXTUALIZACIÓN	14
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivo general.....	15
1.2.2 Objetivos específicos	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO.....	16
2.2 VENTAJAS, INCONVENIENTES Y APLICACIONES DE CADA TIPO DE MANTENIMIENTO.....	19
2.2.1 Mantenimiento Correctivo.....	19
2.2.2 Mantenimiento Preventivo.....	20
2.3 ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO Y MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN	20
2.3.1 Proceso de optimización de la Estrategia de Mantenimiento.....	21
2.3.1.1 Gestión y Cultura de Negocio.....	22
2.3.1.2 Procesos de Mantenimiento.....	22
2.3.1.3 Habilidades del Personal de Mantenimiento	23
2.3.1.4 Tecnologías	23
2.4 MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN.....	23
2.4.1 Mantenimiento Basado en Condición.....	23
2.4.2 Análisis y Selección de Maquinaria a Monitorear.....	25
2.4.3 Análisis Y Selección de Técnicas de Monitoreo de Condición Adecuada.....	26

2.4.4 Técnicas y Tecnologías de Monitoreo de Condición.....	27
2.4.5 Fortalezas y Debilidades de las Técnicas de Monitoreo	27
3. MODELO IMPLMETACIÓN ESTRATEGICA CBM.....	30
3.1 REVISIÓN CONTEXTUAL DE LA NORMA ISO 17359	30
3.1.1 Auditoría de equipos	30
3.1.2 Auditoría de fiabilidad y criticidad.....	30
3.1.3 Selección de las tareas apropiadas de mantenimiento.	30
3.1.4 Seleccionar la técnica, método y alarmas apropiados.	32
3.1.5 Recolección y análisis de datos	32
3.1.6 Determinar acciones de mantenimiento correctivas y registro histórico.....	32
3.1.7 Revisión y evaluación	32
3.2 PLANTEAMIENTO FORMAL DE MODELO	32
3.2.1 Valoración de Viabilidad.....	34
3.2.2 Análisis de Aplicación	40
3.2.2.1 Asignación de responsabilidades y autoridades	41
3.2.2.2 Selección de Activos a Monitorear.	43
3.2.2.3 Selección de Variables, Técnicas & Frecuencias de Monitoreo.....	44
3.2.3 Proceso de Implementación.....	50
3.2.4 Evaluación y Mejora.....	52
3.2.4.1 Medición de Indicadores de Desempeño del Programa CBM.....	52
3.2.4.2 Autoevaluación del Programa de CBM	53
3.2.4.3 Evaluación de la Rentabilidad (ROI) y Ahorro de Costos por CBM.....	54
4. CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFÍA.....	59

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Clasificación general de los tipos de mantenimiento.	16
Figura 2. Diagrama de decisión del tipo de mantenimiento.	17
Figura 3. Curva P-F Desarrollo de Falla vs Aplicación técnicas predictivas.....	24
Figura 4. Optimización de Mantenimiento.....	25
Figura 5. Selección de tecnología dirigida a las causas de falla.....	29
Figura 6. ISO 17359 Flujo Optimo de Monitoreo de Condición.....	31
Figura 7. Modelo de implementación de mantenimiento basado en condición establecido en cuatro fases.	33
Figura 8. Diagrama de bloques de Modelo de implementación de CBM.	34
Figura 9. Interacción entre la tecnología, recurso humano y la organización que implementara CBM.	35
Figura 10. Hoja de Análisis de Modos y Síntomas de Fallas (FMSA).	46
Figura 11. Ejemplo de FMSA en Compresor de Tornillo.....	46
Figura 12. Inicio de Falla – Final de la Falla P-F.....	48
Figura 13. Seleccione la Tecnología con el P-F más largo.....	49
Figura 14. Frecuencia ideal de muestreo.....	50
Figura 15. Esquema de matriz de riesgo para determinación de costo de falla.....	56

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Niveles de intensidad de aplicación de mantenimiento.....	18
Tabla 2. Red de la Excelencia de Mantenimiento.	39
Tabla 3. Indicadores de Desempeño del Programa CBM.	55

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE MODELO ESTRATEGICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN (CBM) EN EL SECTOR DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO.¹

AUTORES: MAIRA ALEJANDRA MURILLO ARIZA ²

PALABRAS CLAVES: MANTENIMIENTO, MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN, MODELO ESTRATEGICO DE IMPLEMENTACIÓN.

DESCRIPCIÓN O CONTENIDO:

A través de este documento se propone el desarrollo de un modelo genérico que establezca los criterios fundamentales en la implementación de mantenimiento basado en condición (CBM) en el sector industrial de producción de petróleo. esto se logra realizando primero un breve análisis contextual del mantenimiento y sus áreas y los beneficios que representa el mantenimiento basado en condición al integrarse como parte de la estrategia de mantenimiento de la planta de producción.

El planteamiento formal del modelo estratégico se consolida bajo la guía y recomendaciones generales de la norma ISO 17359, la cual establece criterios fundamentales para el desarrollo de programas de monitoreo de condición y diagnóstico de maquinaria. posteriormente se propone el desarrollo del modelo de implementación de mantenimiento basado en condición, el cual se establece en cuatro pasos fundamentales.

La valoración de la viabilidad; en esta primera fase se determina si el mantenimiento basado en condición es aplicable en la planta de producción, para ello se deben contar con información del grado de madurez de la organización y de su programa de mantenimiento. en la segunda fase, análisis de aplicación, se establece la asignación de responsabilidades y roles, la selección de los activos a monitorear, la selección de los parámetros a monitorear de acuerdo con cada técnica y la selección de la tecnología apropiada a implementar. en la tercera fase, proceso de implementación, se propone el desarrollo de la implementación desde los aspectos de la gestión e introducción. en la fase final, se establece la evaluación y mejora, en el que se determinara que se desea medir, el que y el porqué de estas mediciones, el alcance y valor agregado que generaran los resultados obtenidos de estas evaluaciones.

¹ Monografía.

² Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Manuel Darío Martínez Carvajal, Ingeniero Electromecánico.

SUMMARY

TITLE: STRATEGIC DEVELOPMENT MODEL FOR IMPLEMENTING CONDITION-BASED MAINTENANCE ON OIL PRODUCTION SECTOR.³

AUTHOR: MAIRA ALEJANDRA MURILLO ARIZA ⁴

KEYWORDS: MAINTENANCE, CONDITION-BASED MAINTENANCE, STRATEGIC DEVELOPMENT MODEL.

DESCRIPTION OR CONTENTS:

Through this document the development of a generic model that establishes the basic criteria in implementing condition-based maintenance (CBM) in the industrial oil production sector is proposed. this is achieved by first conducting a brief contextual analysis of maintenance and its areas and the benefits of condition-based maintenance when integrated as part of the maintenance strategy of the production plant.

The formal approach of the strategic model is consolidated under the guidance and general recommendations of the standard ISO 17359, which establishes fundamental criteria for the development of programs for condition monitoring and machine diagnosis. then it is proposed the development of the condition-based maintenance implementation model, which is established in 4 fundamental steps.

The viability assessment; in this first phase it is determined whether condition-based maintenance is applicable in the production plant, for this purpose, information on the degree of maturity of the organization and its maintenance program must be obtained. in the second phase, application analysis, the assignment of responsibilities and rolls, the selection of the assets to be monitored, the selection of the parameters to be monitored according to each technique and the selection of the appropriate technology to be implemented are established. in the third phase, implementation process, it is proposed the development of the implementation from the aspects of management and introduction. in the final phase, it is established the evaluation and improvement, in which it is determined that it is desired to measure, what and why of these measurements, the scope and added value generated by the results obtained from these evaluations.

³ Monograph.

⁴ Faculty of Engineering Physics and Mechanics. Mechanical Engineering School. Specialization in Maintenance Management. Director: Manuel Darío Martínez Carvajal, Electro-mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

La actual coyuntura mundial sobre la caída y continua baja en los precios del barril de crudo, presenta un escenario particularmente interesante y desafiante para los profesionales y áreas responsables del mantenimiento en las facilidades de producción de petróleo, pues deben adaptarse y evolucionar toda la estrategia de mantenimiento tan rápido como estas condiciones cambiantes lo imponen, por ello se está cada vez más presionado a ser eficientemente competentes, tanto para reducir costos, aumentar y/o mantener el nivel de producción, así como el garantizar una confiabilidad operacional optima de las instalaciones de producción.

Es así como esta mencionada coyuntura, ha transformado el rol de los mantenedores y del área de mantenimiento a un punto de suma relevancia dentro de las compañías de producción petróleo, en la cual su gestión se referencia no como un gasto si no como una inversión, la cual debe ser administrada eficientemente para obtener el máximo de eficiencia. Es aquí donde el Mantenimiento Basado en Condición (CBM) y su integración acertada a la estrategia de mantenimiento desarrolla un papel preponderante para dar soluciones costo-efectivas en el área de mantenimiento.

Poder expresar, soportar y demostrar en términos de ahorro en costos, los resultados obtenidos por detección tempranas de fallas, intervenciones de mantenimiento por condición o por prevención de paros no programados, es el tipo de resultado más esperado y valorado por la organización en épocas de crisis, y que solo se podrá obtener a través de un programa de manteniendo basado en condición correctamente implementado bajo la estrategia y directrices acertadas.

1. CONTEXTUALIZACIÓN

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El sector de producción petróleo en la actualidad, está cada vez más presionado a ser eficientemente competente, tanto para reducir costos, aumentar y/o mantener el nivel de producción, como el garantizar una confiabilidad operacional optima de las instalaciones productivas, cuidando la seguridad de los trabajadores y del ambiente.

Contamos actualmente a la mano de la industria con un sin número de recursos de optimización que pueden implementarse en estos procesos, los cuales dependerán de la naturaleza de los mismos, los costos asociados y la disponibilidad de personal debidamente capacitado para su implementación y puesta en marcha.

Es aquí donde el Mantenimiento Basado en Condición (CBM) desarrolla un papel preponderante para dar soluciones efectivas en el área de mantenimiento. El Mantenimiento Basado en Condición (CBM) actualmente es reconocido como una estrategia costo-efectiva que permite la optimización los programas de mantenimiento tradicionales de forma rentable. Y es en este punto donde inician los principales interrogantes; ¿Por dónde debemos iniciar?, ¿Cuál es la mejor estrategia para nuestra empresa?, ¿Cómo asegurar una buena aplicación de CBM?, y la pregunta clave que del área gerencial ¿Cuánto cuesta implementar un programa de mantenimiento basado en condición?

Basados en estos interrogantes se hace necesario elaborar una estrategia genérica que establezca los criterios fundamentales en la implementación de mantenimiento basado en condición (CBM) en el sector industrial de producción de petróleo.

Esta estrategia se consolidará bajo la guía y directrices generales de la norma ISO 17359, la cual establece criterios fundamentales para el desarrollo de programas de monitoreo de condición y diagnóstico de maquinaria.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general. Definir un modelo de implementación estratégica de mantenimiento basado en condición (CBM) para el sector de producción de petróleo.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Elaborar programa de implementación de CBM alineado a las directrices generales de la norma ISO 17359 - Monitoreo de Condición y Diagnostico de Maquinaria.
- Establecer criterios de evaluación de rentabilidad de implementación de programa de mantenimiento basado en condición
- Estructurar lineamientos para matriz de evaluación de equipos que permitan determinar las técnicas de Mantenimiento Predictivo más efectivas para el diagnóstico y pronóstico de las condiciones.

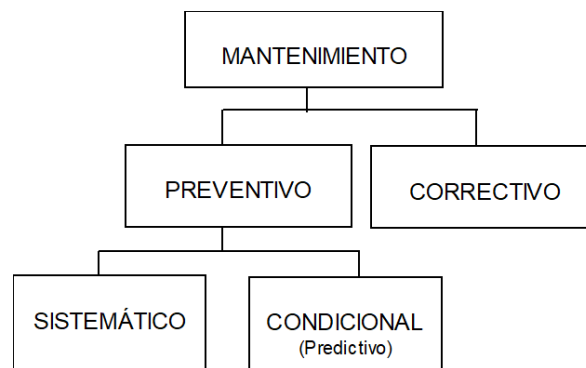
2. MARCO TEÓRICO

2.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO

De acuerdo con la norma ISO 14224:2006 *Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment - Terms and definitions*,⁵ define como mantenimiento preventivo: mantenimiento realizado a intervalos predeterminados o según criterios prescritos, y cuyo fin es reducir la probabilidad de avería o el deterioro del funcionamiento de un aparato. Igualmente se define como mantenimiento correctivo: mantenimiento que se lleva a cabo después de haber reconocido la existencia de una avería, a fin de devolver a la pieza de equipo aquel estado que le permita realizar una función requerida.

Las clasificaciones generales de los distintos tipos de Mantenimiento se representan en la Figura 1.

Figura 1. Clasificación general de los tipos de mantenimiento.



⁵ INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 14224. Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment - Terms and definitions. Ginebra, Suiza: El Instituto, 2002.

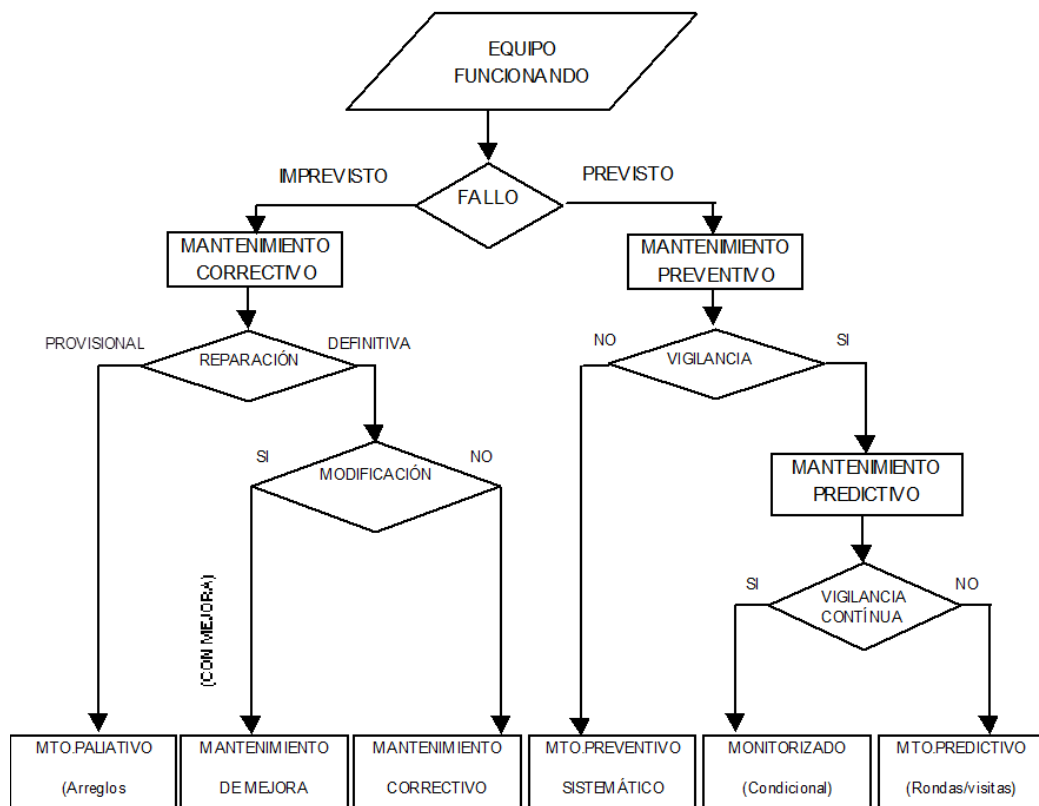
De acuerdo con la figura 1 tenemos que el Mantenimiento Preventivo, se efectúa con intención de reducir la probabilidad de fallo, del que existen dos modalidades:

El Mantenimiento Preventivo Sistemático, efectuado a intervalos regulares de tiempo, según un programa establecido y teniendo en cuenta la criticidad de cada máquina y la existencia o no de reserva.

El Mantenimiento Preventivo Condicional o según condición, subordinado a un acontecimiento predeterminado.

Un diagrama de decisión sobre el tipo de mantenimiento a aplicar, según el caso, se presenta en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama de decisión del tipo de mantenimiento.



En cuanto a los distintos niveles de intensidad aplicables en el mantenimiento se presenta un resumen en el Tabla 1.

Tabla 1. Niveles de intensidad de aplicación de mantenimiento.

NIVEL	CONTENIDO	PERSONAL	MEDIOS
1	<ul style="list-style-type: none"> • AJUSTES SIMPLES PREVISTOS EN ÓRGANOS ACCESIBLES. • CAMBIO ELEMENTOS ACCESIBLES Y FÁCILES DE EFECTUAR. 	<ul style="list-style-type: none"> • OPERADOR, IN SITU 	<ul style="list-style-type: none"> • HERRAMIENTA LIJERA
2	<ul style="list-style-type: none"> • ARREGLOS POR CAMBIO ESTANDAR • OPERACIONES MENORES DE PREVENTIVO (RONDAS). 	<ul style="list-style-type: none"> • TÉCNICO HABILITADO, IN SITU 	<ul style="list-style-type: none"> • HERRAMIENTA LIJERA + REPUESTOS NECESARIOS EN STOCK.
3	<ul style="list-style-type: none"> • IDENTIFICACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE AVERÍAS. • REPARACIÓN POR CAMBIO DE COMPONENTES Y REPARACIONES MECÁNICAS MENORES. 	<ul style="list-style-type: none"> • TÉCNICO ESPECIALIZADO, IN SITU O TALLER. 	<ul style="list-style-type: none"> • HERRAMIENTA + APARATOS DE MEDIDAS + BANCO DE ENSAYOS, CONTROL, ETC.
4	<ul style="list-style-type: none"> • TRABAJOS IMPORTANTES DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO Y PREVENTIVO. 	<ul style="list-style-type: none"> • EQUIPO DIRIGIDO POR TÉCNICO ESPECIALIZADO (TALLER). 	<ul style="list-style-type: none"> • HERRAMIENTA ESPECÍFICA + MATERIAL DE ENSAYOS, CONTROL, ETC.
5	<ul style="list-style-type: none"> • TRABAJOS DE GRANDES REPARACIONES, RENOVACIONES, ETC. 	<ul style="list-style-type: none"> • EQUIPO COMPLETO, POLIVANTES, EN TALLER CENTRAL. 	<ul style="list-style-type: none"> • MÁQUINAS-HERRAMIENTAS Y ESPECÍFICAS DE FABRICACIÓN (FORJA, FUNDICIÓN, SOLDADURA, ETC.)

2.2 VENTAJAS, INCONVENIENTES Y APLICACIONES DE CADA TIPO DE MANTENIMIENTO.

2.2.1 Mantenimiento Correctivo.

Ventajas

- No se requiere una gran infraestructura técnica ni elevada capacidad de análisis.
- Máximo aprovechamiento de la vida útil de los equipos.

Inconvenientes

- Las averías se presentan de forma imprevista lo que origina trastornos a la producción.
- Riesgo de fallos de elementos difíciles de adquirir, lo que implica la necesidad de un “stock” de repuestos importante.
- Baja calidad del mantenimiento como consecuencia del poco tiempo disponible para reparar.

Aplicaciones

- Cuando el coste total de las paradas ocasionadas sea menor que el coste total de las acciones preventivas.
- Esto sólo se da en sistemas secundarios cuya avería no afectan de forma importante a la producción.
- Estadísticamente resulta ser el aplicado en mayor proporción en la mayoría de las industrias.

2.2.2 Mantenimiento Preventivo.

Ventajas

- Importante reducción de paradas imprevistas en equipos.
- Solo es adecuado cuando, por la naturaleza del equipo, existe una cierta relación entre probabilidad de fallos y duración de vida.

Inconvenientes

- No se aprovecha la vida útil completa del equipo.
- Aumenta el gasto y disminuye la disponibilidad si no se elige convenientemente la frecuencia de las acciones preventivas.

Aplicaciones

- Equipos de naturaleza mecánica o electromecánica sometidos a desgaste seguro
- Equipos cuya relación fallo-duración de vida es bien conocida.

2.3 ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO Y MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN

Cuando algunas plantas de producción de petróleo evalúan sus actuales programas de confiabilidad y mantenimiento, a veces se encuentran con la necesidad de considerar una completa reestructuración de sus procesos y programas de manteniendo que les permita re-orientar sus recursos y esfuerzos para cumplir sus metas y necesidades reales. Al acercarse a este tipo de decisiones complejas, es importante tener en cuenta que el mantenimiento afecta a todos los aspectos de la organización. La fiabilidad de la planta de producción debe mantenerse con el fin de lograr los objetivos de producción, garantizar la seguridad de las personas y para

reducir los costos generales de producción al evitar las fallas catastróficas que requieren tiempos de parada extensos.

Un punto clave para mejorar la estrategia de mantenimiento es el programa de mantenimiento basado en condición, el cual está dirigido a la medición de variables físicas de la maquinaria y su condición de degradación con respecto al tiempo, la toma de decisiones a tiempo permite evitar que se presenten averías o eliminar la posibilidad de fallas catastróficas.

Una de las principales ventajas del mantenimiento basado en condición, es que puede ser efectuado mientras el equipo está en servicio, de tal manera que se puede definir su prioridad de mantenimiento y las actividades proactivas, preventivas o correctivas adecuadas para llevar el equipo a un estado funcional y operativo óptimo y evitar además la recurrencia de las fallas.

2.3.1 Proceso de optimización de la Estrategia de Mantenimiento. Para optimizar la estrategia de mantenimiento no solo es importante examinar el proceso de mantenimiento como tal, sino también el enfoque de la gestión, la cultura de trabajo, habilidades y conocimiento del personal y el uso eficaz de las tecnologías a disposición. Por lo tanto, la optimización de la estrategia de mantenimiento de la planta de producción es un programa orientado a crear un ambiente de trabajo que optimiza el uso de los recursos, los procesos de mantenimiento, las habilidades de los empleados, y la tecnología con el fin de cumplir los objetivos de la organización. Un programa de optimización de la estrategia de mantenimiento incluye cuatro aspectos.

2.3.1.1 Gestión y Cultura de Negocio. La creación de un ambiente de trabajo positivo que promueve una cultura de aprendizaje alrededor de la optimización del mantenimiento de la planta de producción. Esto se logra mediante: el establecimiento de objetivos claros; orientación y liderazgo sólido; la promoción de una buena comunicación; las personas conocen sus funciones, responsabilidades y el aporte de sus resultados a la organización; y, proporcionando los medios para aprender de las experiencias del personal. Establecimiento de indicadores de valor que permiten establecer las áreas donde existen oportunidades de mejora.

2.3.1.2 Procesos de Mantenimiento. La implementación de las mejores prácticas de mantenimiento de la industria para reducir al mínimo el impacto sobre la producción y maximizar la utilización de la mano de obra en la optimización del mantenimiento de planta. Esto se logra mediante la identificación del trabajo en el momento oportuno, para que así este pueda ser priorizado, planeado, programado y ejecutado.

El Trabajo debe ser documentado, revisado e historizado. Estos procesos incluyen tanto las labores de mantenimiento de los días a día en la planta, los mantenimientos planeados y no planeados, al igual que los trabajos resultantes de las actividades proactivas, tales como proyectos de ingeniería.

2.3.1.3 Habilidades del Personal de Mantenimiento. Una efectiva optimización del mantenimiento de la planta de producción se logra mediante un personal altamente motivado, formados y calificados en un ambiente seguro de trabajo. Esto se logra al proporcionar al equipo de trabajo un programa de capacitación y entrenamiento adecuado a las necesidades de la planta de producción, este tipo de iniciativas deben orientarse al desarrollo humano del personal de mantenimiento como valor agregado de la organización.

2.3.1.4 Tecnologías. El mantenimiento de la planta de producción es optimizado mediante la implementación de tecnologías que son rentables y que maximizan la eficiencia de los procesos de mantenimiento, como lo son el monitoreo en línea, el cual suministra información oportuna en tiempo real sobre las condiciones del equipo o tecnologías integradas que incorporan el monitoreo en línea y el acceso a múltiples variables y fuentes de información de la planta, las cuales permiten la toma de decisiones y acciones inmediatas, conclusiones y/o recomendaciones de medidas correctivas.

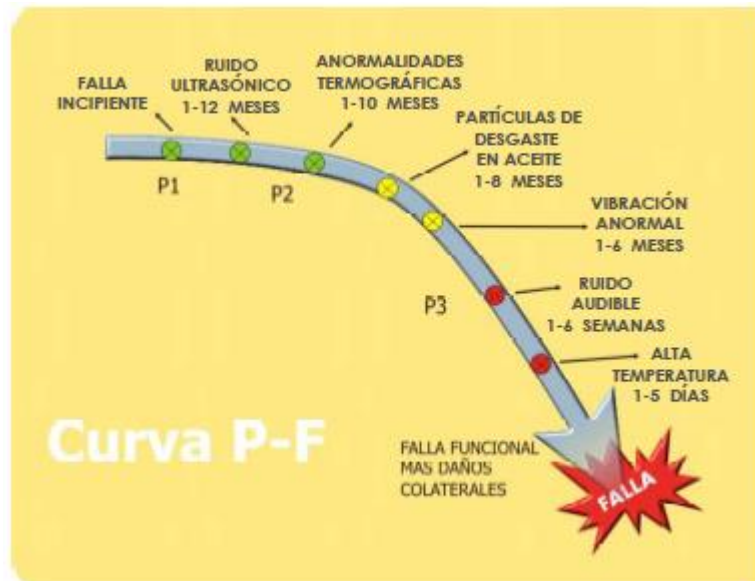
2.4 MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN

2.4.1 Mantenimiento Basado en Condición. El objetivo fundamental del mantenimiento basado en condición, es establecer y conocer de forma anticipada, la condición de la maquinaria, de forma que se pueda determinar su operación de manera segura, eficiente y rentable.

La condición de maquinaria se puede establecer a través de técnicas de monitoreo, las cuales están dirigidas a la medición de variables físicas que son indicadores propios de la condición de la máquina, estas variables se vigilan contra niveles

permisibles basados en estándares industriales, así es posible determinar la severidad en la condición integral de la maquinaria

Figura 3. Curva P-F Desarrollo de Falla vs Aplicación técnicas predictivas.



Como se observa en la Figura 3, es posible establecer una relación directa entre la tendencia que indica la existencia de un fallo en función del tiempo y la evolución de los parámetros seleccionados que pueden establecerse a través del monitoreo de condición, su gravedad y el tiempo en que el equipo puede fallar. La toma de decisiones a tiempo permite evitar que el fallo se presente o eliminar la posibilidad de un fallo catastrófico. La ventaja de esta estrategia, es que puede ser efectuado mientras el equipo está en servicio, de tal manera que se puede definir su prioridad de mantenimiento y las actividades proactivas, preventivas o correctivas adecuadas para llevarlo a un estado funcional y operativo óptimo y evitar además la recurrencia de las fallas.

2.4.2 Análisis y Selección de Maquinaria a Monitorear. La aplicación del mantenimiento basado en condición no es una estrategia económica y deberán ser identificados aquellos equipos en el proceso de producción que afectan a cualquiera de las siguientes:

- Confiabilidad
- Disponibilidad
- Costo
- Seguridad

En cualquier entorno, debemos considerar una condición de optimización de las estrategias de mantenimiento y conservación, de tal manera que los costos de la aplicación de las tecnologías y estrategias no sean superiores a los que se tratan de evitar (ver Figura 4).⁶

Figura 4. Optimización de Mantenimiento.



⁶ <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/10frec.pdf>

2.4.3 Análisis Y Selección de Técnicas de Monitoreo de Condición Adecuada.

La selección de la tecnología adecuada para cada maquinaria depende de varios factores como son: el tipo de maquinaria, el modo de fallo a diagnosticar y la capacidad de inversión.

Una de las mejores maneras de aplicar esta tecnología es mediante el Análisis de Modos de Falla, Efecto y Criticidad. (AMEF). Otras opciones incluyen el desarrollo de metodologías como Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), Análisis de causa raíz, Análisis de Pareto, Análisis de frecuencia de falla (TPEF), etc.

Lo que realmente importa, es que el programa de monitoreo de condición esté dirigido a la causa de falla y que puedan identificarse los indicadores de su deterioro.

Una vez que se ha efectuado el análisis de las causas de falla críticas de la maquinaria, es importante identificar una acción de mantenimiento que permita eliminarla, detectarla y controlarla. De esta manera construimos nuestro plan de mantenimiento. De la misma manera, estamos ahora en condiciones de establecer nuestro programa de monitoreo de condición, seleccionando la tecnología o estrategia que pueda ayudarnos a responder las siguientes preguntas:

1. ¿De dónde proviene?
2. ¿Qué la causa?
3. ¿Qué tan severa es?
4. ¿Se puede controlar?
5. ¿En cuánto tiempo ocurrirá?

2.4.4 Técnicas y Tecnologías de Monitoreo de Condición. El monitoreo de condición es un concepto que ha sido utilizado desde hace mucho tiempo. Por lo general los operadores y mecánicos perciben señales de la maquinaria con sus propios sentidos. Ahora lo que se pretende es amplificar estas señales y aislarlas para incrementar su percepción mediante tecnología y medición.

Las técnicas de monitoreo las podemos clasificar en:

- Inspecciones de la maquinaria
- Mediciones de desempeño de la maquinaria
- Monitoreo de las condiciones dinámicas de la maquinaria
- Monitoreo de los fluidos
- Monitoreo de las partículas de desgaste

2.4.5 Fortalezas y Debilidades de las Técnicas de Monitoreo. Cada una de las técnicas descritas anteriormente tiene fortalezas y debilidades. En función de ellas debemos seleccionar la que pueda responder a las preguntas del profesional de la confiabilidad.

Hagamos la analogía de nuestra situación con la de un médico ante la presencia de una enfermedad. En una primera consulta, por lo general se basa en la descripción de la condición externa del paciente y lo interroga para conocer su estado. Efectúa una inspección visual de los principales indicadores externos, utilizando la vista, los oídos, el tacto y el olfato. Posteriormente puede utilizar instrumentos que le ayuden a precisar la situación, como estetoscopio, lámparas y magnificadores, termómetros, etc. Sus observaciones le irán proporcionando información que debe analizar y procesar para determinar si los síntomas que aprecia son suficientes para diagnosticar una enfermedad.

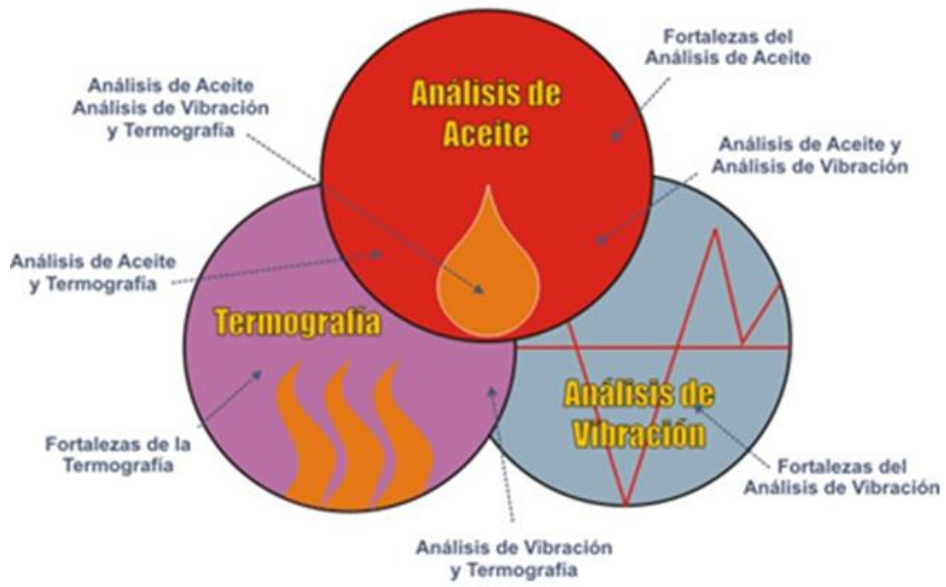
En caso de que la información recibida no sea concluyente, le pedirá al paciente que acuda a efectuar algunos análisis más detallados. Dependiendo de la causa probable, determinará si requiere de un estudio por rayos X, una tomografía, análisis de orina o sangre, electrocardiograma, o incluso una muestra de tejido o inspección interna por cámara de fibra óptica.

Esos resultados, en conjunto con los de su inspección inicial, seguramente le permitirán identificar el síndrome a partir de los síntomas. Sin embargo, la selección de las pruebas es definitiva en el resultado a obtener. En el caso extremo de un daño en el hígado; si el médico selecciona hacer una prueba de rayos X, es seguro que no recibirá información de la causa de falla o de los efectos.

Sin embargo, la muestra de sangre, orina y probablemente un ultrasonido pueden ayudar a diagnosticar adecuadamente antes de que la condición se vuelva crítica.

Hagamos pues, un análisis de nuestras causas de falla y veamos cuál técnica o tecnología tiene la capacidad de responder a la mayor cantidad de las cinco preguntas planteadas arriba. Bien; ahora veamos cuáles de ellas tienen la capacidad de avisarnos antes que las otras y como estas tecnologías y técnicas se interrelacionan entre sí (Ver Figura 5).

Figura 5. Selección de tecnología dirigida a las causas de falla.



3. MODELO IMPLMETACIÓN ESTRATEGICA CBM

3.1 REVISIÓN CONTEXTUAL DE LA NORMA ISO 17359

La norma ISO 17359:2011 *Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines*, establece las directrices para los procedimientos generales que se deben considerar al establecer un programa de monitoreo de condición de máquinas. Esta norma incluye referencias a estándares asociados requeridos en este proceso aplicable a máquinas de cualquier tipo.

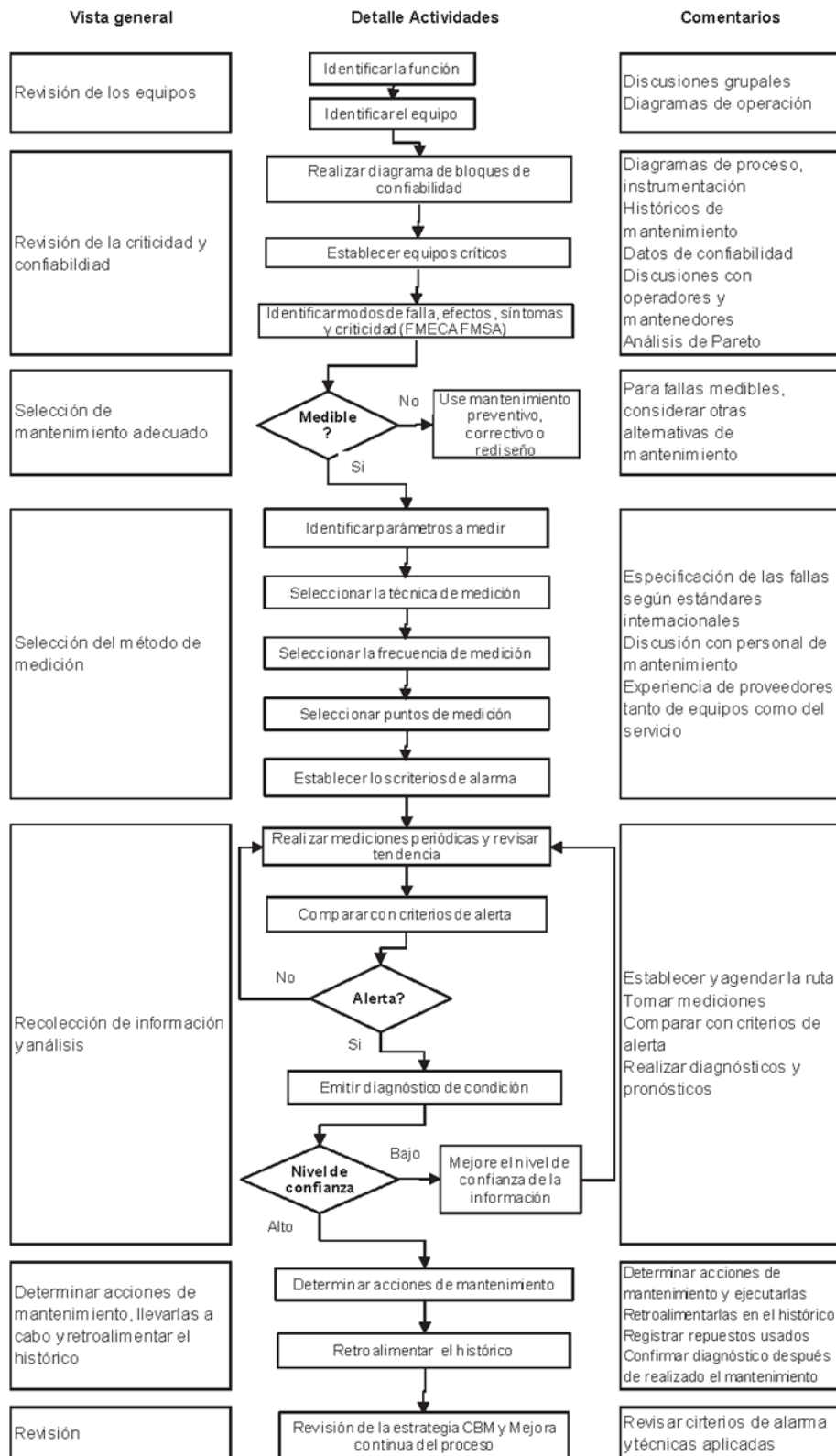
En la Figura 6 se presenta el flujograma descrito en la norma ISO 17359 para la implementación de programas de monitoreo de condición, da continuación se describe de manera general las pautas planteadas en el flujograma.

3.1.1 Auditoría de equipos. Identificación de los equipos y sus funciones, de acuerdo con su jerarquía funcional y técnica, realizando levantamiento de información de los equipos planta, revisando diagramas de procesos y dialogando con personal en sitio.

3.1.2 Auditoría de fiabilidad y criticidad. Desarrollo de diagrama de bloques sobre la fiabilidad, se establezca la criticidad de cada equipo y se identifiquen modos de fallo, sus efectos y criticidad.

3.1.3 Selección de las tareas apropiadas de mantenimiento. Estudiar si es viable o no aplicar la estrategia predictiva a cada equipo.

Figura 6. ISO 17359 Flujo Optimo de Monitoreo de Condición.



3.1.4 Seleccionar la técnica, método y alarmas apropiados. Establecimiento de parámetros a medir, que de técnica de monitoreo de condición se debe seleccionar, puntos de medición y criterios de alerta y alarma.

3.1.5 Recolección y análisis de datos. Toma de datos y registro de tendencias, comparación con criterios de alerta y alarma, desarrollo de diagnósticos y pronósticos.

3.1.6 Determinar acciones de mantenimiento correctivas y registro histórico. Recomendación para intervención de mantenimiento de acuerdo a modo de falla identificado, validación y verificación del diagnóstico emitido luego de la intervención de mantenimiento, retroalimentación y registro en historial de monitoreo.

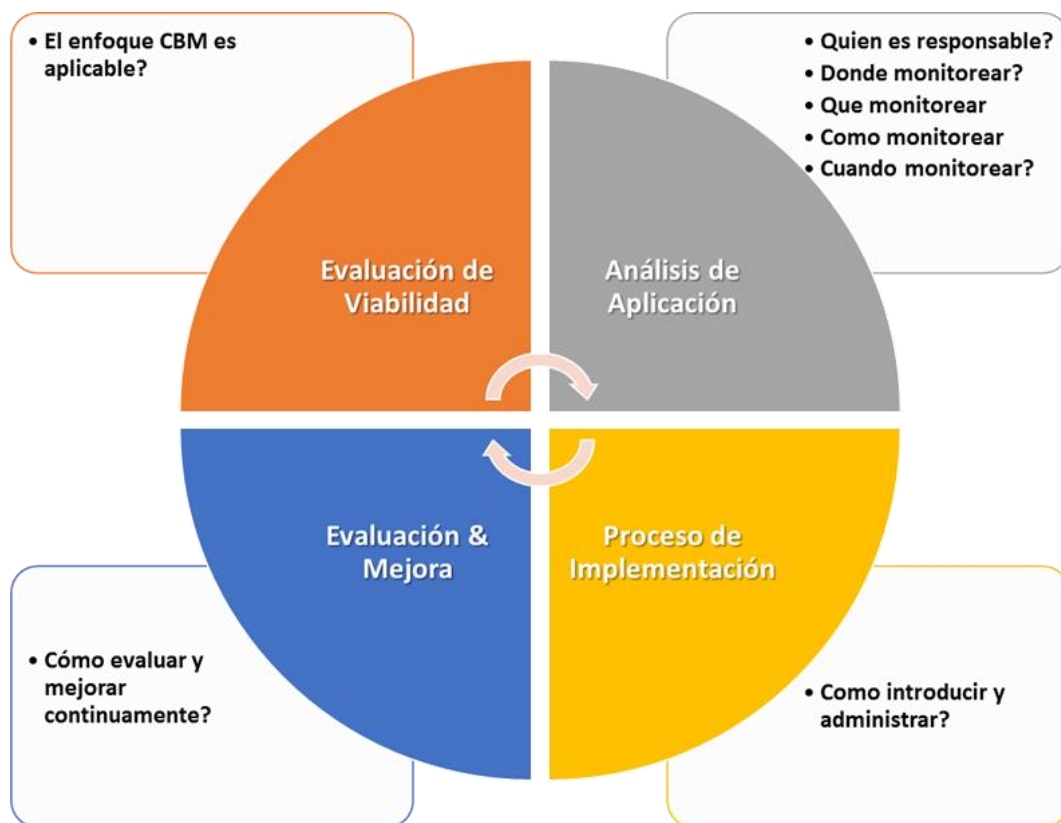
3.1.7 Revisión y evaluación. Validación de criterios de alertas y alarmas, revisión de las técnicas predictivas disponibles.

3.2 PLANTEAMIENTO FORMAL DE MODELO

El modelo de implementación de mantenimiento basado en condición se establece en cuatro fases, como se observa en la Figura 7 y la Figura 8. El proceso se inicia con la evaluación de viabilidad, es aquí donde se debe establecer si el enfoque de mantenimiento basado en condición es aplicable o no. Si es así, el proceso continúa con una fase de análisis de aplicación, donde se debe responder a preguntas como: ¿quién es el responsable del proceso, donde es aplicable el monitoreo, que se deberá monitorear, cómo se ejecutará el monitoreo, y cuándo deberá el monitoreo ser ejecutado. A raíz de las respuestas a estas preguntas, el proceso continúa con

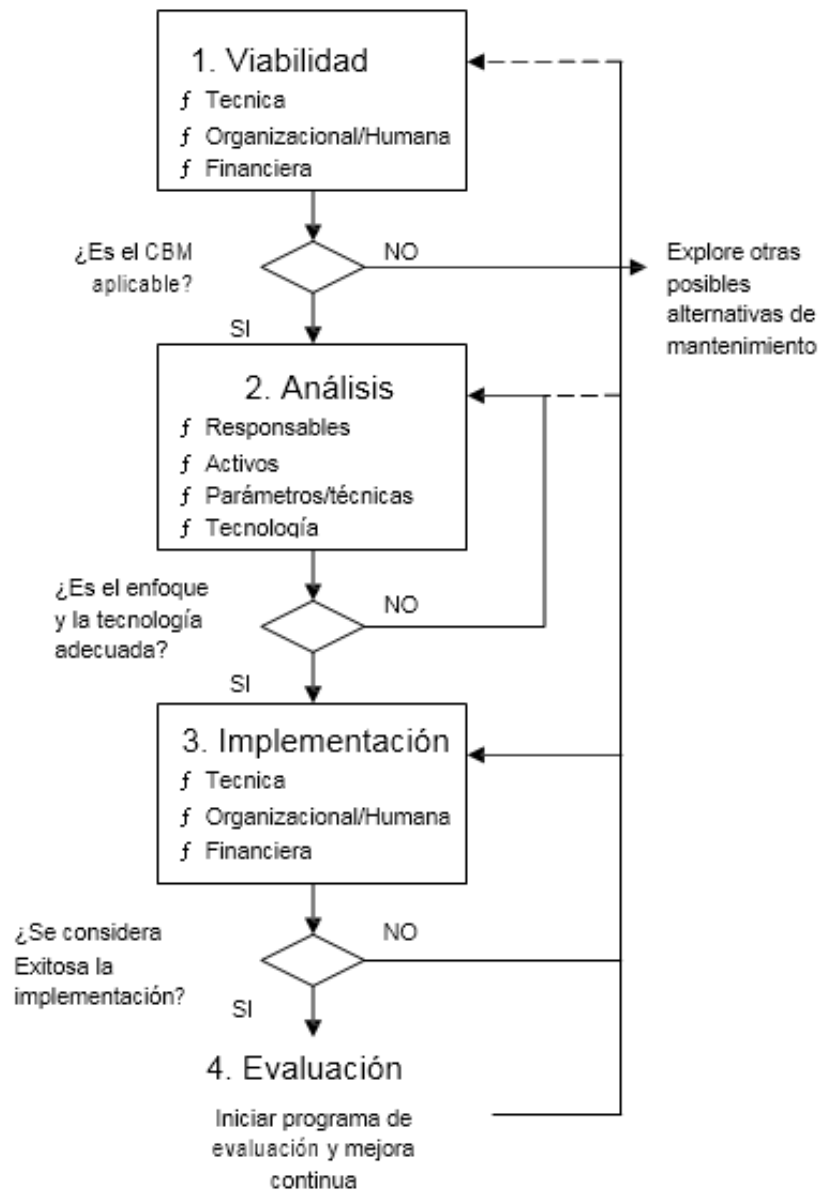
la implementación de las soluciones entorno de la organización, es aquí donde la gestión y la introducción al procedo proceden. Finalmente, se establece una fase de evaluación y mejora continua, en el punto en el cual el modelo de implementación ya es continuo, es aquí donde se inician los programas de mejora continua.

Figura 7. Modelo de implementación de mantenimiento basado en condición establecido en cuatro fases.



El componente integral del modelo de implementación de mantenimiento basado en condición es como da síntesis y extracta en cuatro fases, las directrices generales que se deben considerar al establecer un programa de monitoreo de condición de máquinas de acuerdo a la norma ISO 17359:2011.

Figura 8. Diagrama de bloques de Modelo de implementación de CBM.

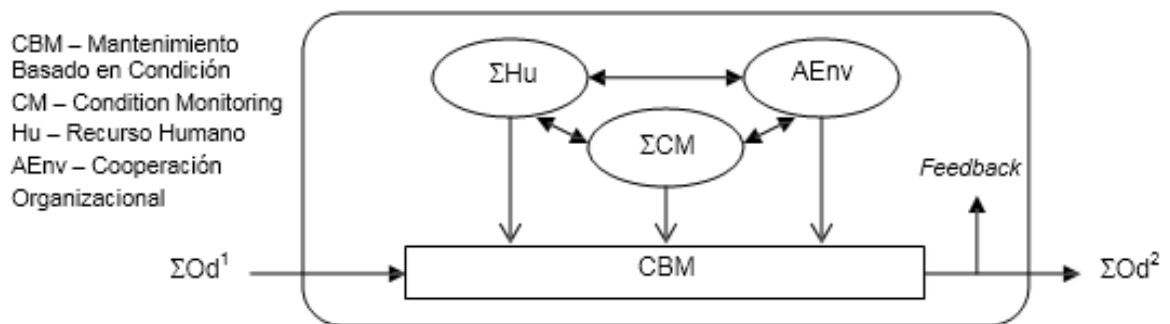


3.2.1 Valoración de Viabilidad. El modelo de implementación de mantenimiento basado en condición inicia con la fase de Valoración de Viabilidad, es aquí donde deberemos responder a la pregunta si el mantenimiento basado en condición es aplicable en la planta de producción.

El mantenimiento basado en condición, la adquisición e implementación de tecnologías de monitoreo, consideraciones y decisiones fundamentales del proceso, no deben ser decididos o ejecutados producto del azar. Por el contrario, se debe dar lugar a una evaluación minuciosa antes de considerar las primeras inversiones en el proceso. La decisión de si se debe implementar el mantenimiento basado en condición debe hacerse tanto a nivel técnico como financiero dentro de la organización.

Un factor adicional a tener en cuenta a la hora de valorar la viabilidad de la implementación del mantenimiento basado en condición, es la organización en sí misma y su grado madurez. Tanto en la teoría, como la guía general de la norma menciona la relevancia de este factor adicional. Es necesario asegurarse de que la tecnología apropiada será implementada en el equipo adecuado y que debe considerarse y evaluarse la madurez de la organización antes de decidir que tecnologías de mantenimiento basado en la condición se van aplicar en la planta de producción (ver Figura 9).

Figura 9. Interacción entre la tecnología, recurso humano y la organización que implementara CBM.



En esta fase inicial se sugiere no tratar de definir la aplicabilidad del programa de mantenimiento basado en condición (CBM) en un nivel muy profundo. Debemos por lo tanto recurrir a la implementación de herramientas y/o metodologías de medición, que nos permitan evaluar la aplicabilidad del programa CBM de forma sencilla. Se sugiere en esta fase que la organización emplee herramientas bien conocidas. En la cual se podría considerar la aplicación de una versión simplificada del FMEA y/o los árboles de decisión. En el aspecto técnico, las preguntas que pueden considerarse con el fin de evaluar la aplicabilidad pueden ser las siguientes:

- ¿Son conocidos los modos y efectos de falla de los equipos, y si es así, son medibles?
- ¿Existen indicadores adecuados del estado de falla y su degradación, y si es así ¿hay herramientas de diagnóstico adecuadas para medir los indicadores?
- ¿Es el defecto o la degradación reversible?
- ¿Es posible reducir la probabilidad de daño mayor?

En el aspecto financiero, es difícil evaluar las implicaciones de costos con una alta precisión en una etapa tan temprana. Además, puede que no se considere muy relevante, aunque lo sea. Sin embargo, la evaluación de la inversión, incluso en la forma más simple, debe visualizarse como una necesidad. Las discusiones y el intercambio de ideas sobre los posibles beneficios, en comparación con lo que podría ser un posible costo de la inversión, el costo de la pérdida de producción, pérdida de clientes, etc., deberán emplearse como información fundamental de entrada para la evaluación de la inversión.

La evaluación de la madurez de la organización es un tema importante. Realizarla ayuda de gran manera a prever que futuro tendrá la implementación del mantenimiento basado en condición dentro de la organización.

A pesar de que la tecnología dentro del mantenimiento basado la condición se puede encontrar de diferentes niveles, desde alta tecnología a baja tecnología, e incluso sin tecnología, se debe considerar, lo que podríamos llamar 'la cultura de mantenimiento'. De este modo, al pasar de una cultura y mentalidad de correctiva 'apaga incendios' a una mentalidad predictiva, posiblemente con herramientas de alta tecnología, puede ser en muchos casos, un paso demasiado grande como para asimilar. Es por ello que se debe iniciar por un proceso de culturización y familiarización del personal de planta, implementar algunas acciones predeterminadas a priori y crecer en madurez antes de implementar el mantenimiento basado en la condición en su totalidad.

Las auditorías de mantenimiento y las evaluaciones a nivel comparativo, entre otras, se pueden utilizar para evaluar la madurez de una organización de mantenimiento. La auditoría se puede utilizar para ver si la organización es lo suficientemente madura para la implementación del mantenimiento basado en condición. Varios investigadores han desarrollado diferentes métodos para la evaluación de la madurez del mantenimiento.

Una de estas herramientas que puede considerarse apropiada para esta fase de evaluación de la implementación de CBM, es la es la metodología que se menciona en el libro UPTIME, Estrategias para la Excelencia en la Gestión del Mantenimiento del señor John Dixon Campbell, a quien se le atribuye ser precursor de esta herramienta, y quien estableció 10 temas importantes a diagnosticar en las organizaciones de mantenimiento, estas son:

1. Características de la empresa.
2. Estrategia de mantenimiento y del entorno.
3. Modalidades de organización y gestión de recursos humanos.
4. Administración de Mantenimiento.
5. Planeación, programación y gestión de la orden de trabajo.

6. Mantenimiento preventivo y predictivo.
7. Registros e historia de los equipos.
8. Compra, almacenamiento y control de inventario de piezas.
9. Medición del desempeño y satisfacción del cliente.
10. Automatización y tecnología de la información.

Con base en estos 10 ítems fundamentales, se estableció una matriz llamada Red de la Excelencia de Mantenimiento mostrado en el Tabla 2.

La Matriz de Excelencia permite identificar el grado de madurez de las Organizaciones de Mantenimiento, mediante la evaluación de diez (10) áreas de gestión, a saber:

Área 1: Estrategia de Mantenimiento

Área 2: Administración y Organización

Área 3: Planeación y Programación

Área 4: Técnicas de Mantenimiento

Área 5: Medidas de Desempeño

Área 6: Tecnología de la información y su uso

Área 7: Involucramiento de los Empleados

Área 8: Análisis de Confiabilidad

Área 9: Análisis de Procesos

Área 10: Información sobre infraestructura e instalaciones

La matriz permite clasificar a las Organizaciones de Mantenimiento en diferentes categorías, dependiendo del nivel de desarrollo de cada una de las áreas de gestión.

Tabla 2. Red de la Excelencia de Mantenimiento.

RED LA DE EXCELENCIA DE MANTENIMIENTO									
CLASE	ESTRATEGIA	GESTIÓN DE RECURSO HUMANO	PLANEACIÓN Y PROGRAMACIÓN	TECNICAS DE MITTO	MEDIDAS DE DESEMPEÑO	TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN	INVOLUCRAMIENTO DE LOS EMPLEADOS	ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD	ANÁLISIS DE PROCESOS
CLASE MUNDIAL	Estrategia Corporativa de Mantenimiento	Multi-habilidades independiente de la operación	Mayor planificación de proyectos e ingeniería a largo plazo	Todas las técnicas empleadas basadas en análisis	Efectividad de Equipos. Benchmarking y excelente base de datos de costos	Base de datos totalmente integradas	Equipos de trabajo autónomos	Programa total de confiabilidad	Revisión regular de los procesos de costo, tiempo y calidad.
COMPETENTE	Plan de mejora a largo plazo	Algunas multi-habilidades	Buena planeación del trabajo, programación y soporte de ingeniería	Algunos CBM. Algunos PM.	MTBF/MTTR, Availability, costos de mantenimiento por separado	Totalmente funcional. Vinculado a finanzas/material	Equipos de mejoramiento continuo	Algunas FMECA implementada	Alguna revisión de la admón., procedimientos de ingeniería y operaciones
CONSCIENTE	Plan de mejora a un año	Descentralizados grupo de operaciones mixta	Grupos de planeación e ingeniería de mantenimiento establecidos formalmente	Inspecciones basadas en tiempo y uso. Algunos NDT	Tiempo de paradas con causa y costos de mito disponibles	Totalmente funcional. Ningún vínculo con otro sistema	Comités de mejoramiento del lugar de trabajo	Buena base de datos de falla, bien utilizada	Revisiones periódicas de procesos o procedimientos técnicos y documentación de los procesos administrativos
INSATISFACTORIO	Plan de Mejoramiento de Mantenimiento Preventivos	Parte centralizada para algunos grupos	Soporte en la detección de fallas. Inspección en la programación	Inspección basada en tiempo	Algunos registros de tiempos de inactividad y costos de mantenimiento no segregados	Mito básico programado. Algunos registros	Algunas reuniones de mejoramiento en seguridad	Registro de fallas poco usado	revisión de procesos solo una vez
INOCENTE	Principalmente reactivo a falla	Altamente centralizada	No planeación, poca programación y no existe ingeniería	Inspección únicamente a Paradas anuales	No se aprovecha el sistema. costos de mito no	Manual para sistemas de especialidad ad-hoc	Solo reuniones con el personal para tocar temas sindicales o sociales	No existe registro de fallas	Nunca han revisado

Autor: Jhon Dixon Camprell, UPTIME Strategies for Excellence in Maintenance Management

La clasificación de acuerdo con el puntaje global obtenido, sobre 100 puntos, es la siguiente:

- Mantenimiento “Inocente” (Puntaje obtenido es de 0 a 10 puntos).
- Mantenimiento “Insatisfactorio” (Puntaje obtenido es de 10 a 20 puntos).
- Mantenimiento “Consciente” (Puntaje obtenido es de 20 a 50 puntos).
- Mantenimiento “De lo Mejor en su Clase” (Puntaje obtenido es de 50 a 70 puntos).
- Mantenimiento “Clase Mundial” (Puntaje obtenido es de 70 a 100 puntos).

Al evaluar cada una de las áreas de gestión, se identifican las fortalezas y las debilidades de la organización de mantenimiento; los hallazgos se constituyen en insumos para la definición de planes de mejoramiento a corto, mediano y largo plazo con el objeto de alcanzar un mejor grado de desempeño, buscando posicionarse como una organización “De lo Mejor en su Clase” (Basada en Confiabilidad) o “Clase Mundial”, de acuerdo con los objetivos corporativos trazados.

3.2.2 Análisis de Aplicación. En la fase de análisis de aplicación, es donde debemos responder el qué, donde, cómo, cuándo y quién debe controlar la implementación del programa de mantenimiento basado en condición. A continuación, los pasos a seguir dentro en esta fase estarán determinados por; la asignación de responsabilidades y roles, la selección de los activos a monitorear, la selección de los parámetros a monitorear de acuerdo con cada técnica y la selección de la tecnología apropiada a implementar.

3.2.2.1 Asignación de responsabilidades y autoridades. Luego de la fase de análisis de viabilidad, en la cual la organización ha decidido la implementación del mantenimiento basado en condición para la planta de producción, el siguiente paso fundamental es la definición y establecimiento de los roles y responsabilidades en la ejecución del proceso CBM. Lo ideal es que la organización establezca un grupo de trabajo, dentro del departamento de mantenimiento, con experiencia y conocimiento en metodologías de monitoreo de condición y técnicas predictivas, exclusivamente dedicados al desarrollo del programa de mantenimiento basado en condición.

Este grupo de ingenieros y/o técnicos deben ser introducidos al personal de planta para luego ser identificados como propietarios del programa CBM que se estime, pues así mismo como ejecutores y responsables de las técnicas predictivas y de monitoreo, deben conocer en todo momento, la condición y el rendimiento de los equipos. Estas personas deberán estar aplicando y promoviendo visiblemente el proceso de CBM en la planta. El apoyo a la gestión para el proceso de CBM debe ser visible.

Por lo general, el CBM en sí mismo no es regulador. Por lo tanto, debe ser impulsado por la gerencia de mantenimiento. Se debe ser consiente desde la partida de la implementación que no se obtendrán mayores beneficios, mejoras y/o optimización en la gestión de mantenimiento, producto de la implementación de CBM, si el propio personal de mantenimiento u operación de la planta no apoya o no percibe que el CBM tiene una importante tarea y aporte a la producción de la planta. Es común en programas CBM recién implementados, que la confianza en el CBM para la toma de decisiones se perciba con mayor riesgo. Esta percepción de alto riesgo, sin un incentivo para asumir ese riesgo, resulta en un personal desmotivado para avanzar en la implementación del CBM.

Es por ello que la mejor práctica es que la estrategia de mantenimiento esté bien entendida y pueda ser articulada desde la gerencia de mantenimiento, coordinadores de mantenimiento en planta y el personal responsable del programa CBM. Es así como la calidad y consistencia de los datos recopilados, deberán estar respaldados por el conocimiento de personal con experiencia, calificado y/o certificado. Igualmente, entre las responsabilidades de los ingenieros CBM, se debe considerar tener tiempo suficiente para la generación de análisis oportunos y de calidad, estos análisis serán considerados adecuadamente en las decisiones de acciones correctivas que los coordinadores de mantenimiento y operación en planta estimen.

Determinado este contexto, tenemos que las consideraciones más relevantes en la asignación de responsabilidades son:

- La organización debe conocer y apoyar el desarrollo del programa CBM.
- La organización debe establecer un grupo de trabajo, bien definido (grupo o departamento, supervisor, ingenieros CBM, técnico CBM), calificado y exclusivo dedicado al desarrollo del programa de monitoreo basado en condición.
- Este personal asignado para el desarrollo del programa de monitoreo basado en condición, debe entender claramente sus roles, las responsabilidades y alcance dentro de la estrategia de mantenimiento.
- La organización deberá proporcionar todos los recursos adecuados (capacitación y equipo) al personal tanto responsable del programa CBM, para las aplicaciones tecnológicas y procesos de implementación en planta.

3.2.2.2 Selección de Activos a Monitorear. Se trata de listar la maquinaria que será objeto de monitoreo, esta selección principalmente se basa en la criticidad de los equipos. ¿Qué tan importante son los activos para el proceso productivo?, ¿Cuál es su impacto a la seguridad y al ambiente en caso de fallas?, ¿Cuál es el costo de su mantenimiento?, ¿Cuáles equipos tienen fallas recurrentes o con mayor frecuencia?.

Las respuestas a estas preguntas nos indican el estatus de criticidad de estos equipos y son la primera referencia para seleccionar los activos que integrarán el programa de mantenimiento basado en condición. Comenzar con los más equipos más críticos es una buena práctica y luego progresivamente incluir los de menor criticidad. Así el Análisis de Criticidad puede emplearse como una herramienta efectiva en la implementación del CBM en planta. En este paso se incluye la recolección de la información técnica y operacional de cada activo a monitorear.

Como parte del desarrollo del modelo de implementación estratégica de mantenimiento basado en condición (CBM) para una planta de producción de petróleo, se propone el desarrollo de una Matriz de Evaluación de Equipos para monitoreo de condición, en la que se incluirán los criterios y metodología que permitirán determinar los equipos a monitorear, que técnicas de mantenimiento predictivo y monitoreo de condición más efectivas para cada tipo equipo y la determinación de la frecuencia de inspección.

Las consideraciones a tener en cuenta para la elaboración y selección del listado de equipos que se incluirán en el programa de mantenimiento basado en condición tenemos:

- Contar con un diagnóstico del estado actual de los activos de la planta de producción es de gran utilidad, pues se tendrá de manera clara y actualizada, la situación y circunstancia actual, a nivel físico, mecánico y operacional, en

la que se encuentran dichos equipos. Para lograr esto, se deben emplear técnicas como la observación directa de los equipos en su entorno operacional, entrevistas con el personal técnico, operadores y personal de los activos, revisión de variables de proceso de la planta, entre otros.

- Junto al ítem anterior, contar con la información técnica de los equipos de planta recopilada y actualizada en un listado maestro, es un insumo fundamental a la hora de establecer criterios y evaluación de la selección de los equipos que se incluirán en el programa de mantenimiento basado en condición.

3.2.2.3 Selección de Variables, Técnicas & Frecuencias de Monitoreo. Una vez identificados y listados los equipos sobre los cuales se ejecutará el programa de mantenimiento basado en condición, el siguiente paso en el proceso de será qué monitorear, es decir, qué variables y con qué técnica.

Para la selección de las variables a monitorear y técnicas a implementar, se propone que dentro de la Matriz de Evaluación de Equipos para monitoreo de condición, se elabore un Análisis de Modos y Síntomas de Fallas – FMSA, el cual establecerá la selección de las técnicas de monitoreo de condición e inspección basados en la calificación MPN (Número de Prioridad de Monitoreo), el cual se calcula de la siguiente forma (ver Figura 10 y 11):

$$MPN = DET \times SEV \times DGN \times PGN$$

Donde:

- DET: Probabilidad de Detección del síntoma, usando la técnica especificada. Calificación de 1 a 5, siendo 1 una probabilidad remota de detección y 5 una certeza en la detección.

- SEV: Severidad de la falla causada por no haber detectado el síntoma a tiempo. Calificación de 1 a 4, siendo 1 la degradación de las funciones del sistema y 4 la pérdida de funciones del sistema, incluyendo afectación al entorno y pérdida de vidas humanas.
- DGN: Exactitud del diagnóstico. Calificación de 1 a 5, siendo 1 una probabilidad remota de que el síntoma sea diagnosticado acertadamente usando la técnica y 5 una certeza de que el síntoma será detectado con la técnica.
- PGN: Pronóstico de modo de falla. Calificación de 1 a 5, siendo a uno una probabilidad remota de que el pronóstico de modo de falla sea exacto y 5 la certeza de que el pronóstico de modo de fallo.

Un valor alto del MPN indica que la técnica de monitoreo nominada es la más adecuada para la detección, diagnóstico y pronóstico del modo de falla asociado.

Entre las consideraciones a tener en cuenta para el desarrollo de la metodología de Análisis de Modos y Síntomas de Fallas (FMSA)s que se incluirán en el programa de mantenimiento basado en condición tenemos:

- Liste los componentes involucrados.
- Liste los modos de falla posibles para cada componente.
- Liste los efectos de cada modo de falla.
- Liste las causas de cada modo de falla.
- Liste los síntomas producidos por cada modo de falla.
- Jerarquice cada modo de falla por detección, severidad, confianza en el diagnóstico y confianza en el pronóstico resultado en el MPN (Monitoring Number Priority).
- Liste la técnica más adecuada de monitoreo.
- Liste la frecuencia estimada de monitoreo.
- Liste las técnicas más apropiadas de correlación.
- Liste la frecuencia de monitoreo para las técnicas de correlación.

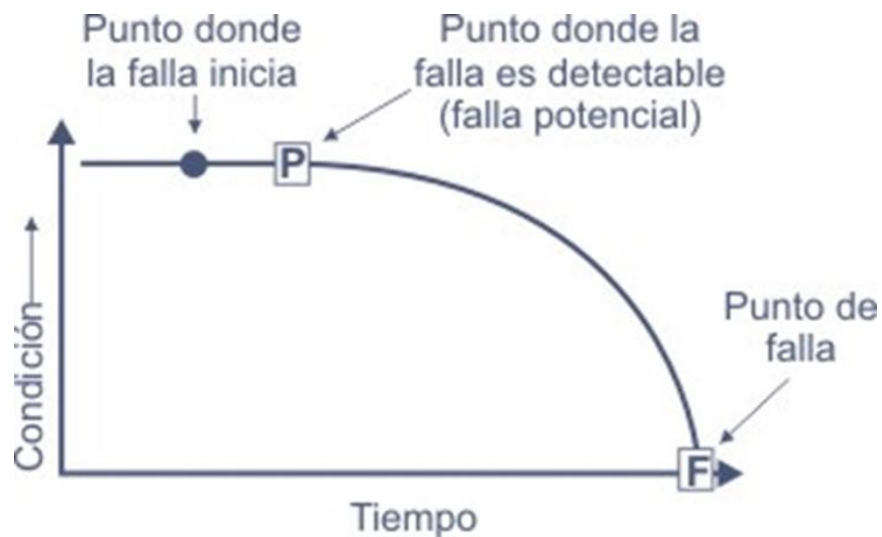
Una vez establecido el método de selección de las variables y técnicas para monitorear la causa de falla y sus efectos, es necesario determinar la frecuencia de aplicación de cada técnica con la que se ejecutara el programa de mantenimiento basado en condición.

Para ello se recomienda considerar una de las herramientas de RCM: el análisis del periodo P-F. Toda la maquinaria debe entregar un rango de desempeño. Mientras el desempeño esperado se mantenga dentro de esos límites, se considera que el activo está efectuando su trabajo. La pérdida de desempeño puede deberse a un deterioro gradual del equipo por su funcionamiento y entonces estaremos esperando que el tiempo que transcurra sea equivalente a la vida útil esperada del equipo (TEV).

Otro escenario es que se presente una causa de falla en el equipo que pueda acortar su desempeño. Cuando esta causa de falla se presenta, el periodo de vida esperada del equipo se acorta y tendremos una falla del equipo antes del TEV. Dependiendo del modo de falla, será la severidad del daño y por consecuencia el tiempo en que la equipo fallará.

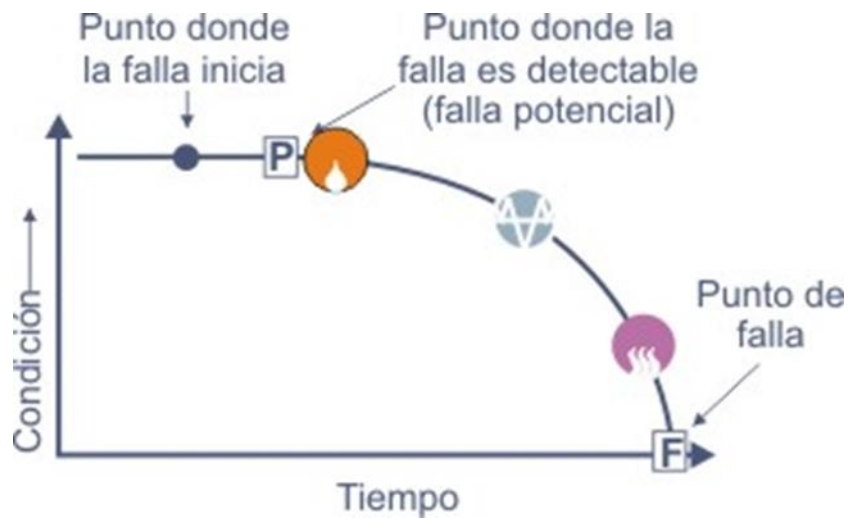
El punto P en este análisis, es el momento en que la causa de falla se puede detectar en el equipo (P siempre será posterior al momento en que la causa de falla se presenta) y F es el momento en el que el activo llega a su límite inferior de desempeño (Ver Figura 12).

Figura 12. Inicio de Falla – Final de la Falla P-F



Es muy importante señalar que, en un mismo modo de falla, podemos tener varios P-F, dependiendo de la técnica que se seleccione. El analista debe seleccionar la técnica que proporcione el periodo P-F más largo que permitirá que la toma de decisiones permita mantener el equipo dentro de su rango de desempeño útil (Ver Figura 13).

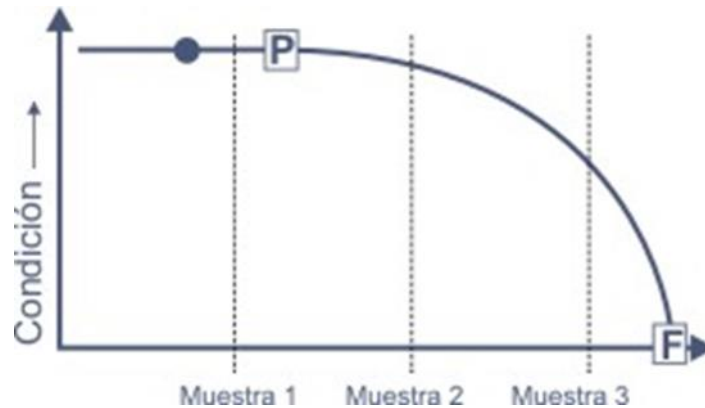
Figura 13. Seleccione la Tecnología con el P-F más largo.



Una vez que hemos seleccionado la técnica que proporciona el P-F más largo, debemos establecer el periodo de monitoreo que nos permita capturar el modo de falla que significa el P-F crítico más corto en el equipo. Si nuestra frecuencia de monitoreo (FM) es establecida con una frecuencia igual al P-F, entonces nuestra posibilidad de detectar el problema es muy remota. Si, por el contrario, nuestra FM es mayor que P-F, entonces nuestro programa no será capaz de detectar este problema y nuestro programa carece de sentido.

A partir de lo anterior, es obvio que nuestra FM debe ser menor que P-F. Idealmente deberá ser establecida como $FM = P-F/3$. De esta manera estamos en la condición de detectar el inicio del problema, su avance y todavía estar en condiciones de monitorear el final de la vida del equipo (Vea Figura 14).

Figura 14. Frecuencia ideal de muestreo.



En muchas ocasiones la maquinaria puede tener un P-F demasiado corto para algunos modos de falla, ocasionando que las tecnologías de monitoreo deban ser efectuadas en línea para garantizar su efectividad.

3.2.3 Proceso de Implementación. Una vez establecida la fase de Análisis de Aplicación del modelo de implementación estratégica de mantenimiento basado en condición (CBM) para una planta de producción de petróleo, se continua con la fase del Proceso de Implementación.

Como se ha mencionado anteriormente, la aplicación e integración del mantenimiento basado en condición no es simplemente una cuestión de la aplicación de una tecnología, sino más bien la implementación de una nueva cultura. Hay factores como; el humano, organizacional y tecnológico, que se deben tener muy presentes, de manera que la interacción que se dé entre estos tres tipos de factores, confluyan de manera apropiada para alcanzar el éxito en la implementación del programa CBM.

Dentro de la fase del proceso de implementación, que se plantea para el modelo de implementación estratégica de mantenimiento basado en condición (CBM) para una planta de producción de petróleo, se propone que se enfoque en dos aspectos fundamentales, la gestión y la introducción.

Desde el punto de vista de la gestión, es clave e importante, todo el soporte y apoyo que pueda brindar la gerencia a la implementación y difusión de la implementación del programa de mantenimiento basado en condición. Es necesario que los objetivos de esta fase de implementación se fijen en una etapa temprana del proceso. Los objetivos deben establecerse con diferente proyección y alcance en el tiempo, unos objetivos a largo plazo y corto plazo serán funcionales. Igualmente es esencial para la organización, al menos, el departamento de mantenimiento, estar involucrado en el establecimiento de estos objetivos, ya que se supone que deben cumplir y evaluar estos objetivos en una etapa posterior.

Además, en el desarrollo de la gestión es de gran valor nombrar Líderes. Los empleados que apoyan firmemente las nuevas tecnologías y métodos y que pueden ser comunicadores y facilitadores en la difusión y comunicación entre los diferentes departamentos y entre la alta dirección, mandos intermedios y empleados. Las responsabilidades y deben haber sido asignados en la fase anterior.

No obstante, las responsabilidades y autoridades para el proceso de implementación (e incluso más allá) son esenciales con el fin de no experimentar que la puesta en práctica del proceso llegue a un punto muerto, sin saber quién debe decidir las próximas acciones o actividades.

Desde el punto de vista de la introducción, se deberían haber tomado todas las decisiones y todos los esfuerzos deben centrarse en el cambio cultural real (es decir, la aplicación). Muchas de las actividades deben llevarse a cabo con el fin de no perder el impulso. El enfoque del mantenimiento basado en condición necesita ser

integrado en otros departamentos, además de mantenimiento. El departamento de operaciones de planta debe ser introducido y hacerlo parte integral de los beneficios que traerá a la implementación el CBM. En la planta de producción de petróleo los operadores son los empleados más cercanos a los equipos y procesos, teniendo así el conocimiento más profundo de la condición de los equipos

Una buena y fuerte cooperación entre las áreas de mantenimiento y operaciones será un excelente medio para aumentar la efectividad en la implementación del programa de mantenimiento basado en condición. La implementación puede iniciarse con un proyecto piloto, el cual puede ser un buen método para la comprobación de las decisiones que se van tomando a medida que avanza la implementación.

3.2.4 Evaluación y Mejora. Para la fase final del modelo de implementación estratégica de mantenimiento basado en condición (CBM) para una planta de producción de petróleo, se plantea la realización de la Evaluación y Mejora del programa CBM, para ello debemos establecer de manera clara, que deseamos medir en la evaluación y para qué, y el alcance y valor agregado que generaran los resultados obtenidos de estas evaluaciones.

A continuación, se plantean tres perspectivas de evaluación significativas para el modelo de implementación estratégica de mantenimiento basado en condición.

3.2.4.1 Medición de Indicadores de Desempeño del Programa CBM. En la actualidad las plantas de producción de petróleo en sus distintos programas y procesos tienen establecidos objetivos definidos con sus respectivas métricas para medir su desempeño y progreso hacia las metas trazadas.

Desde la implementación del programa de mantenimiento basado en condición, es fundamental la definición y establecimiento de medidas de desempeño que reflejen claramente el progreso y avance del programa CBM. En la Tabla 3 podemos ver un ejemplo de un conjunto de indicadores de desempeño para el programa CBM.

3.2.4.2 Autoevaluación del Programa de CBM. La autoevaluación del proceso CBM proporciona pautas para determinar la efectividad que las tecnologías están siendo empleadas e identifica oportunidades de mejora. Es recomendable la realización de la autoevaluación a modo de auditoría, en la fase inicial de implementación del programa de CBM, puede parecer prematura su realización, sin embargo, es de gran valor para el establecimiento de una métrica de progreso del programa desde sus inicios.

Dentro de la autoevaluación se examina la interacción entre el grupo CBM y otras áreas interesadas para determinar dónde existen interfaces y cómo se intercambia información. Se evalúa la eficacia del intercambio de información y el uso correspondiente de los datos. Se identifican las áreas de mejora. De acuerdo con la EPRI, la evaluación está estructurada en torno a 14 áreas de enfoque.

Se ha establecido que estas 14 áreas cubren completamente y efectivamente el alcance total del proceso de CBM. Estas 14 áreas se listan a continuación:

- Tareas Básicas.
- Aplicación de las tecnologías de CBM.
- Definición del flujo de proceso.
- Liderazgo y coordinación del programa.
- Organización roles y responsabilidades.
- Gestión de la información y la comunicación.
- Evaluación de la condición del equipo y la toma de decisiones.

- Entrenamiento y certificaciones.
- Priorización de trabajos y programación.
- Cierres de órdenes de trabajo y retroalimentación de mantenimiento.
- Objetivos y medidas de desempeño.
- Calculo de costos-beneficios y retornos sobre la inversión.
- Satisfacción del cliente.
- Mejora continua.

3.2.4.3 Evaluación de la Rentabilidad (ROI) y Ahorro de Costos por CBM. Los resultados obtenidos del programa de mantenimiento basado en condición deberán registrarse desde el inicio de su implementación.

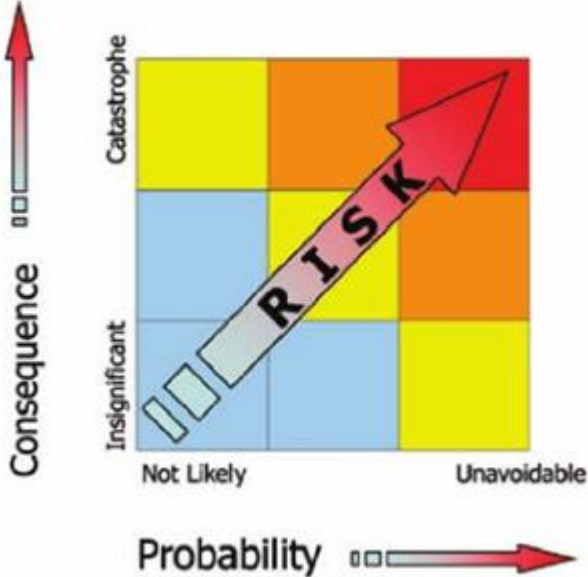
Las historias de los hallazgos, los costos implicados, los beneficios y las contribuciones al desempeño de las plantas deben documentarse, divulgarse y utilizarse para justificar y demostrar el crecimiento y el aporte de la implementación del programa de mantenimiento basado en condición en la planta, así mismo, la gerencia deberá entender y apoyar el valor de estas actividades.

Para establecer los criterios de evaluación de rentabilidad dentro del modelo de implementación estratégica de mantenimiento basado en condición (CBM) para una planta de producción de petróleo, se propone el desarrollo y aplicación de una matriz de riesgo, la cual permitirá determinar el costo asociado al riesgo de la falla, en función a la probabilidad de falla, frente a las consecuencias asociadas a su impacto (operación, seguridad, ambiente, costos de reparación). Ver Figura 15.

Tabla 3. Indicadores de Desempeño del Programa CBM.

Indicador	Descripción Item	Fórmula	Definición de Parámetros	Descripción Medición
Cumplimiento del Programa de Monitoreo MPD	Evalúa el cumplimiento de ejecución de las rutas de monitoreo MPD en un determinado periodo de tiempo, puede medirse por cada técnica MPD y en forma global para todo el programa MPD.	$\text{Cumpl Prog} = \frac{R_{\text{ejec}}}{R_{\text{prog}}} \times 100$	CumplProg: Cumplimiento en la Ejecución de Rutas de Monitoreo MPD Rejec: Rutas de Monitoreo MPD Ejecutadas Rprog: Rutas de Monitoreo MPD Programadas	La medición de este indicador puede realizarse particularmente para cada técnica y en base a esto sacar una medición global de cumplimiento del programa (calcular el global como un promedio ponderado); puede graficarse en forma de tendencia.
Efectividad de Diagnósticos CBM	Ortaleza de diagnósticos y recomendaciones realizadas por el analista CBM respecto a la verificación de la falla encontrada.	$\text{Efect Diag} = \frac{D_{\text{acert}}}{TD_{\text{emit}}} \times 100$	Efect Diag: Efectividad de Diagnóstico y Recomendaciones CBM Dacert: Diagnóstico CBM Acertados TDemit: Total de Diagnósticos CBM Emitidos	Esta medición se realiza para cada técnica MPD independientemente y su resultado debe ser avalado por el ingeniero que custodia el programa.
Efectividad del Programa CBM	La efectividad del programa CBM es un indicador que nos muestra la capacidad del programa CBM para cumplir con su objetivo.	$\text{Efect Prog} = \frac{E_{\text{CBM}} - EF_{\text{CBM}}}{E_{\text{CBM}}} \times 100$	EfectProg: Efectividad del Programa CBM ECBM: Equipos incluidos en el Programa de CBM EFCBM: Equipos incluidos en el programa de CBM que han Presentado Fallas	Las fallas tenidas en cuenta para la medición de este indicador deberán evidenciarse con modos de falla que puedan ser monitoreados por una técnica MPD aplicada. La medición de este indicador puede realizarse particularmente para cada técnica y en base a esto sacar una medición global de cumplimiento del programa (calcular el global como un promedio ponderado); puede llevarse en forma de tendencia.
Condición Equipos	Gráfico de tendencia que permite observar la condición de los equipos mes a mes.	$\frac{EDC_{\text{norm}}}{TEM}, \frac{EDC_{\text{accep}}}{TEM}, \frac{EDC_{\text{aler}}}{TEM}, \frac{EDC_{\text{pel}}}{TEM}$	EDChorm: Equipos Diagnosticados en Condición Normal DEaccep: Equipos Diagnosticados en Condición Aceptable DEaler: Equipos Diagnosticados en Condición Alerta o Insatisfactorio DEpel: Equipos Diagnosticados en Condición Peligroso TEM: Total de Equipos Monitoreados	La medición de este indicador debe realizarse de manera particular en forma global y debe graficarse en forma de tendencia mensual. Podrá observarse la condición de los equipos por técnica y por cantidad de equipos en el formato o matriz de integración de técnicas MPD.
Cumplimiento en Implementación de Recomendaciones CBM	Comparación entre el conjunto de recomendaciones ejecutadas respecto al mismo conjunto de recomendaciones emitidas durante un periodo de tiempo determinado.	$CIRC_{\text{CBM}} = \frac{R_{\text{ejec}}}{R_{\text{emit}}} \times 100$	CIRCBM: Cumplimiento en Implementación de Recomendaciones CBM Rejec: Recomendaciones de CBM Ejecutadas Remit: Recomendaciones de CBM Emitidas	La medición de este indicador debe realizarse particularmente para cada técnica; puede graficarse en forma de tendencia. Cálculo acumulado.
Antigüedad de recomendaciones CBM	Gráfico que muestra la cantidad o porcentaje de recomendaciones emitidas que se encuentran pendientes por ejecutar en diferentes intervalos de antigüedad.	Antigüedad = (0 - 2 sem), (2 - 4 sem), (4 - 6 sem), etc.	Antigüedad: Antigüedad de las Recomendaciones CBM en intervalos de 2 semanas en aumento.	Este gráfico puede realizarse particularmente para cada técnica o en forma general para todo el programa.
Generación Ordenes de Trabajo CBM (Restauración de Condición)	Cantidad de OT's generadas por CBM ó Porcentaje de OT's generadas por CBM respecto a las OT's totales generadas por mantenimiento.	$GOI_{\text{CBM}} = OT_{\text{CBM}} (x \text{mes})$ $GOI_{\text{CBM}} = \left[\frac{OT_{\text{CBM}}}{OT_{\text{TM}}} \right] \times 100$	OT _{TM} : Cantidad OT's Totales Generadas por Mantenimiento OT _{CBM} : Cantidad OT's Generadas por CBM	Este indicador muestra mensualmente la tendencia de generación de OT's tipo CBM en el sistema de información MAXIMO EAM. Debe presentarse gráficamente en forma de tendencia.

Figura 15. Esquema de matriz de riesgo para determinación de costo de falla.



4. CONCLUSIONES

En la actualidad los programas y estrategias de mantenimiento de las plantas de producción de petróleo, se ven altamente fortalecidos y respaldados por el mantenimiento basado en condición a quienes implementan dentro de su programa de mantenimiento, pues ha demostrado ser una herramienta de generación de valor para la organización.

Del desarrollo del modelo genérico para la implementación del mantenimiento basado en condición presentado en este documento podemos extractar las siguientes conclusiones:

- El desarrollo e implementación exitoso de un programa de monitoreo de condición dependerá en gran medida del grado de madurez de la organización y del respaldo y patrocinio que la gerencia de al programa CBM. Debe orquestarse una buena interacción entre la organización, el recurso humano y la tecnología para llevar un desarrollo óptimo del programa de mantenimiento basado en condición a implementar.
- Un correcto análisis y selección de los responsables y sus roles, de la tecnología adecuada a implementar y la identificación objetiva de los equipos y sus frecuencias de monitoreo, marcarán la pauta del buen desarrollo y resultados que se obtendrán de la implementación del programa de monitoreo de condición.
- La evaluación y medición del desempeño del desarrollo, resultados e implementación del programa de monitoreo basado en condición desde su temprana implementación, serán herramienta fundamental para trazar la evolución del programa, su crecimiento y aporte a la estrategia de

mantenimiento, así como el valor agregado que representa para la organización, los ahorros asociados a los hallazgos de potenciales fallas en los equipos.

BIBLIOGRAFÍA

BENGTSSON, Marcus. Decision-Making During Condition Based Maintenance Implementation. 20th International Conference of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management. Coimbra, Portugal. 2007.

CHÍA, Oswaldo. Guías para la Implantación de un Programa de Monitoreo de Condición bajo normas ISO 17359 e ISO 13374. [En línea]. Agosto de 2010. [Consultado el: 15 de julio de 2018]. Disponible en: reliabilityweb.com/assets/uploads/art/PDF/guias_para_la_implementation.pdf

DUARTE, Juan Carlos. Fundamentos para la gestión de mantenimiento predictivo. Seminario Aciem, 2006.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). Predictive Maintenance Self-Assessment Guidelines for Nuclear Power Plants, 2000.

GIRDHAR, Paresh. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Elsevier. Oxford, 2004.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 13379. Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines on data interpretation and diagnostics techniques. Ginebra, Suiza: El Instituto, 2002.

_____. ISO 13380. Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines on using performance parameters. Ginebra, Suiza: El Instituto, 2003.

_____. ISO 14224. Petroleum and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. Ginebra, Suiza: El Instituto, 2004.

_____. ISO 17359. Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines. Ginebra, Suiza: El Instituto, 2011.

MOBLEY, Keith. An introduction to Predictive Maintenance. Second Edition. Woburn, EE.UU: Elsevier Editores, 2002. 409 p. ISBN: 978-075-067-531-4.

MORA GUTIÉRREZ, Alberto. Mantenimiento: planeación, ejecución y control. México: Alfaomega grupo editorial, 2009. ISBN: 978-958-682-769-0.

MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Edición en Español. Leicester: Aladon Ltd, 2004. 433 p. ISBN: 09539603-2-3.

TRUJILLO, Gerardo. Monitoreo de Condición - Una estrategia de Integración de Tecnologías. [En línea]. Octubre de 2003. [Consultado el: 30 de mayo de 2018]. Disponible en: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/10frec.pdf>