



**Diagnóstico y evaluación de los indicadores de las etapas de operación y mantenimiento
en el ciclo de vida de los activos de SAR ENERGY.**

Héctor Alexander Castellanos

William Rodríguez Galindo

Trabajo de Monografía para optar por el título de Especialista en Gestión de Activos.

Tutor:

Juan Carlos Orrego Barrera, Magister en Gestión energética industrial

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Gestión de Activos

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Rodríguez Galindo & Castellanos Zuleta, 2023)
Referencia	Rodríguez Galindo, W.R. & Castellanos Zuleta, H.A.C. (2023) Diagnóstico y evaluación de los indicadores de las etapas de operación y mantenimiento en el ciclo de vida de los activos de SAR ENERGY.
Estilo APA 7 (2020)	[Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Gestión de Activos.



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Contenido

Contenido	3
Figuras	5
Tablas	6
Ecuaciones	7
Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
Planteamiento del Problema	11
Antecedentes	11
Formulación pregunta de problema o mejora	12
Preguntas secundarias	12
Objetivos	13
General	13
Específicos	13
UNO – CMD	13
DOS - Capacidades del activo humano	13
TRES – Estrategia	13
CUATRO – Mejoras	13
CINCO - Conclusiones	14
Marco Teórico	15
Servicios de pruebas de pozo	15
Mantenimiento de equipos	21
Mantenimiento correctivo:	21
Mantenimiento preventivo:	22
Mantenimiento predictivo:	22
Tiempo Promedio para Reparar (TPPR) – Mean Time To Repair (MTTR):	22
Disponibilidad:	22
Utilización:	22
Confiabilidad:	22
Procedimientos de Mantenimiento:	23
Programa de Mantenimiento:	23
Historial de mantenimiento:	23
Inspección:	23
Estado del Arte	24
Metodología	34
Etapas	34
Etapas 1. Revisión documental de listado de activos y delimitación de activos.	34
Etapas 2. Identificación de indicadores utilizados por SAR ENERGY en las áreas de Operación y Mantenimiento.	35
Etapas 3. Definir la estrategia para la medición de indicadores en las etapas de Operación y Mantenimiento de los activos.	35
Etapas 4. Análisis de las capacitaciones para el personal de Operación y Mantenimiento relacionados con la gestión de activos.	35
Etapas 5. Propuesta de indicadores para medir la gestión de activos en las etapas de Operación y Mantenimiento que muestre generación de valor.	35
Cronograma de actividades	36
Resultados esperados	36

<i>Desarrollo técnico</i>	<i>37</i>
<i>Etapa 1. Revisión documental de listado de activos y delimitación de activos.....</i>	<i>37</i>
<i>Etapa 2. Identificación de indicadores utilizados por SAR ENERGY en las áreas de operación y mantenimiento.....</i>	<i>44</i>
<i>Etapa 3. Estrategia para la medición de indicadores en las etapas de O&M de los activos.</i>	<i>49</i>
<i>Etapa 4. Análisis de capacitaciones para el personal O&M relacionados con la gestión de activos.....</i>	<i>53</i>
<i>Etapa 5. Propuesta de indicadores.....</i>	<i>55</i>
<i>Conclusiones</i>	<i>65</i>
<i>Referencias bibliográficas.....</i>	<i>68</i>

Figuras

Figura 1 - Sistema Kantiano CMD	18
Figura 2 - Sistema Kantiano CMD	25
Figura 3 - Sistema Kantiano CMD	26
Figura 4 - Niveles estratégicos de mantenimiento operación y máquinas.....	33
Figura 5 - P&ID Proyecto Indico.	39
Figura 6 - Taxonomía de equipos SAR ENERGY.....	40
Figura 7 - Disponibilidad Alcanzada	46

Tablas

Tabla 1 - Operación en cifras actuales.	16
Tabla 2 - Listado equipos proyecto Indico.	40
Tabla 3 - Listado equipos principales Proyecto Indico.	42
Tabla 4 - Valoración de criticidad.....	43
Tabla 5 - Valoración de probabilidad	43
Tabla 6 - Matriz de criticidad.....	44
Tabla 7 - Criticidad por colores.....	44
Tabla 8 - Personal operativo campo Indico.....	54
Tabla 9 - Análisis de capacitaciones.....	54
Tabla 10 - Cuadro de mando.....	64

Ecuaciones

Ecuación 1 - Producción diferida	29
Ecuación 2 - Efectividad y LCC en mantenimiento	29
Ecuación 3 - Disponibilidad Alcanzada.....	47
Ecuación 4 - Disponibilidad Operacional - D_O - A_O	48
Ecuación 5 - % de mantenimiento reactivo.....	52

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

8

Resumen

Durante el ciclo de vida de los activos, las etapas de operación y mantenimiento desempeñan una función vital en todos los procesos productivos o de servicios industriales o empresariales, que utilizan máquinas, equipos y activos para cumplir su objetivo social, ya que permite garantizar la funcionalidad plena de los activos cuando estos son requeridos para cumplir su razón de diseño y su objetivo dentro de un proyecto. De acuerdo a esto, es importante conocer dentro de las estrategias que aplica SAR ENERGY para la operación y mantenimiento si los activos generan valor agregado, lo cual se puede medir a través de unos indicadores que evidencien la efectividad de estas etapas en la gestión de activos y hacia los proyectos que ejecuta SAR ENERGY.

Palabras clave: mantenimiento, operación, valor agregado, ciclo de vida, gestión de activos.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

9

Abstract

During the life cycle of assets, the operation and maintenance stages play a vital role in all production processes or industrial or business services, which use machines, equipment and assets to meet their social objective, since it allows guaranteeing functionality of the assets when they are required to fulfill their design reason and their objective within a project. Accordingly, it is important to know within the strategies that SAR ENERGY applies for operation and maintenance if the assets generate added value, which can be measured through indicators that demonstrate effectiveness of these stages in asset management and towards the projects executed by SAR ENERGY.

Keywords: maintenance, operation, added value, life cycle, asset management.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

10

Introducción

En el dinámico entorno empresarial actual, la gestión efectiva de activos se erige como un pilar fundamental para la sostenibilidad y el crecimiento de las organizaciones. En particular, las etapas de operación y mantenimiento de activos físicos se revelan como aspectos críticos para garantizar no solo la funcionalidad, sino también la generación de valor a largo plazo.

En este contexto, SAR ENERGY, una empresa con una sólida trayectoria en el sector energético, se enfrenta al desafío de maximizar el valor generado por sus activos durante las fases de operación y mantenimiento. A pesar de la implementación de indicadores relacionados con la gestión de mantenimiento y operaciones, aún no se ha logrado capturar de manera clara y específica el valor que estas etapas aportan al ciclo de vida de sus activos.

Este documento se enfoca en abordar esta brecha identificada, proponiendo un análisis exhaustivo de los indicadores actuales utilizados por SAR ENERGY y la formulación de un conjunto de indicadores más precisos y relevantes. El objetivo principal radica en evidenciar cómo las actividades de operación y mantenimiento se traducen directamente en la generación de valor para la empresa.

A lo largo de este informe, se explorarán las distintas dimensiones de las etapas de operación y mantenimiento, desde la evaluación de indicadores existentes hasta el análisis detallado de la influencia del talento humano en estas fases críticas del ciclo de vida de los activos. Además, se contemplará la contextualización dentro del sector hidrocarburos, donde SAR ENERGY despliega su expertise y servicios.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

11

El propósito último es proponer un modelo integral de indicadores que refleje de manera precisa el valor generado por las operaciones y el mantenimiento de activos, permitiendo a SAR ENERGY una toma de decisiones más informada y estratégica para su crecimiento sostenible en la industria energética.

Planteamiento del Problema

Durante el ciclo de vida útil de los activos, las etapas de operación y mantenimiento juegan un papel fundamental en una adecuada gestión. Desarrollar una operación segura, evitando daños en los activos por mala operación; es decir, minimizando los mantenimientos correctivos; ejecutando planes de mantenimiento según los requerimientos de los activos, contar con el personal competente para la ejecución de estas etapas.

Una adecuada operación de los activos físicos garantiza que el ciclo de vida pueda extenderse generando mayor valor a SAR ENERGY. En la actualidad, la alta dirección ve las actividades de mantenimiento como un gasto, igualmente los indicadores que utiliza SAR ENERGY para medir las etapas de operación y mantenimiento no reflejan la generación de valor. Actualmente, no hay un indicador que muestre el valor que generan los activos a SAR ENERGY.

A través de este análisis se pretende establecer un indicador que permita mostrar el valor que generan las etapas de operación y mantenimiento a los activos de SAR ENERGY.

Antecedentes

Dentro de los proyectos de servicios de pruebas de pozo y servicios de Operación & Mantenimiento (O&M) que ejecuta SAR ENERGY se realiza operación y mantenimiento de equipos propios de la flota de SAR ENERGY y en algunos proyectos equipos propiedad del cliente.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

12

Para el mantenimiento de los equipos de SAR ENERGY, se cuenta con planes de mantenimiento a los que se hace seguimiento a través del software SYSMAN; sin embargo, este software se limita a cargar OT y listados de equipo, lo que hace difícil establecer unos indicadores que permitan evaluar la efectividad del mantenimiento. En ese caso, a través de un archivo en Excel se elabora unos indicadores que están asociados a disponibilidad de flota.

Estos indicadores realmente no muestran o concluyen de qué manera los activos en sus etapas de operación y mantenimiento generar valor a la empresa SAR ENERGY.

Formulación pregunta de problema o mejora

¿Cómo analizar los indicadores actuales de las etapas de mantenimiento y operación de SAR ENERGY, realizando una propuesta de indicadores que permitan evidenciar la generación de valor de los activos en los proyectos que ejecuta SAR ENERGY?

Preguntas secundarias

¿El desempeño del activo humano que interviene en las etapas de operación y mantenimiento afecta el ciclo de vida de los activos de SAR ENERGY?

¿Las estrategias actuales aplicadas por SAR ENERGY en las etapas de operación y mantenimiento generan valor a los activos permitiendo aumentar la confiabilidad de los activos?

Objetivos

Los principales logros para alcanzar del proyecto se circunscriben a los siguientes hechos u objetivos.

General

Desarrollar un plan de mejoras en las etapas de operación y mantenimiento, que se alcanzan con la cuantificación y análisis de los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad, para los activos en SAR ENERGY.

Específicos

UNO – CMD

Definir los criterios necesarios para medir las funciones de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad para una adecuada gestión en las etapas de mantenimiento y operación, del ciclo de vida de los activos en SAR ENERGY.

DOS - Capacidades del activo humano

Comparar las capacidades requeridas del ser y del activo humano para gestionar de manera óptima, las etapas de operación y mantenimiento durante el ciclo de vida.

TRES – Estrategia

Identificar estrategias y acciones que sean aplicables a los activos de SAR ENERGY en las etapas de mantenimiento y operación para maximizar la confiabilidad y la mantenibilidad, respectivamente a partir del análisis de la Curva de Davies o de la bañera.

CUATRO – Mejoras

Describir los beneficios esperados que se derivan de las mediciones de confiabilidad y mantenibilidad a lograr en los equipos, de la gestión de activos de SAR ENERGY.

**DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN
Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY**

14

CINCO - Conclusiones

Recomendar o construir un nuevo modelo de indicadores de confiabilidad y mantenibilidad, para los activos en SAR ENERGY.

Marco Teórico

El sector Hidrocarburos en Colombia representa uno de los más importantes para la economía colombiana como lo indican los datos de exportaciones del DANE (DANE, 2023) actualizados al 4 de abril de 2023 que muestran que el sector aporta el 29% del total de las exportaciones del País.

Para el cumplimiento de estos datos de exportación, la extracción de hidrocarburos se compone de varias fases como son la exploración, producción, transporte, refinación y comercialización. Dentro de estas fases la empresa SAR ENERGY presta sus servicios a las empresas operadoras en las fases de exploración y producción. SAR ENERGY es una empresa de origen colombiana con 15 años en el mercado, como lo indica en su brochure (SAR ENERGY, 2023). Ofrece entre otros “servicios de pruebas de pozo / Surface Well Testing, servicio de Operación & Mantenimiento (O&M). Brindamos datos primarios de alta fidelidad, críticos para la caracterización de yacimientos y la evaluación de campos petroleros y gasíferos en Colombia.”

Servicios de pruebas de pozo

Actualmente SAR ENERGY tiene una participación de aproximadamente el 11% del total de la producción nacional de crudo.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

16

Tabla 1 - Operación en cifras actuales.

OPERACIÓN EN CIFRAS ACTUALES				
Operadora	API	Barriles Crudo (BOPD)	Barriles Agua (BWPD)	Producción Gas (MMSCFD)
GEPARK	14°- 28°	54.056	213.728	0,26
ONGC- VL	38°	13.165	560	0,17
PAREX RESOURCES	15°- 38°	17.460	89.135	7,70
PAREX VERANO	15°	1.414	8.241	11,45
PETROSUD	15°- 41°	197	6.065	9,49
Total		86.292	317.729	29.07

FUENTE: ANH - PRODUCCIÓN FISCALIZADA, CRUDO MARZO 2021

11,55% de la producción nacional de crudo.

Tomado de Brochure de servicios de SAR ENERGY.

Para la realización de las pruebas cortas y/o extensas de pozo en superficie, se tiene establecido un P&ID¹ o PFD² general para ejecutar los armes en cada proyecto se deben cumplir unos pasos previos a la ejecución de la prueba:

1. Ubicación y conexión de líneas (tubería de golpe 206, 602 y 1502) y equipos (Choke Manifold, Válvula ESDV, Separador, Gun Barrel, Tanques de almacenamiento, Bombas, Generador Eléctrico, Tablero eléctrico) desde cabeza de pozo por parte del personal de operaciones.
2. Verificar que todas las conexiones de tubería y hacia cada equipo tengan empaques y no se evidencien malos ajustes.
3. Realizar ajuste de todos los sistemas de medición (turbinas, registradores de presión diferencial, etc.).
4. Realizar conexionado de todo el sistema eléctrico desde el generador eléctrico hacia el tablero eléctrico y desde allí a todos los equipos que requieren ser

¹ P&ID: Process and Instrument Diagram (Diagrama de procesos e instrumentación)

² PFD: Process Flow Diagram (Diagrama de flujo de procesos)

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

17

energizados (caseta workshop, caseta oficina, patines de bombas, compresores de aire y bomba para química); realizar encendido a generadores y pruebas de giro a motores eléctricos; todas actividades a realizar por parte del Técnico Electromecánico.

5. Realizar la instalación y las conexiones de los diferentes equipos al sistema de aire, verificación y pruebas por parte del Técnico Instrumentista.
6. Realizar la correcta alineación de todas las válvulas del proceso desde cabeza de pozo hasta los cargaderos de acuerdo con el diagrama de proceso establecido.
7. Realizar la prueba hidrostática de presión para todo el sistema comprendido por las secciones: cabeza de pozo - SDV³, ESDV - *Choke manifold*, *Choke manifold* - Separador y posteriormente proceder de igual forma para el sistema aguas abajo de este último.
8. Posteriormente, se recibe la indicación del cliente de acuerdo a los parámetros operativos establecidos se alineará todo el sistema para iniciar el recibo de fluido.
9. Hacer monitoreo de parámetros operacionales en todo el sistema durante el tiempo estimado de la prueba y las indicaciones del cliente.

Los servicios prestados por SAR ENERGY tienen como objetivos principales entregar datos confiables de producción, garantizar la disponibilidad de los equipos requeridos para las operaciones y ejecutar la operación sin incidentes ambientales, operacionales y de salud para los trabajadores.

³ SDV: Shut Down Valve

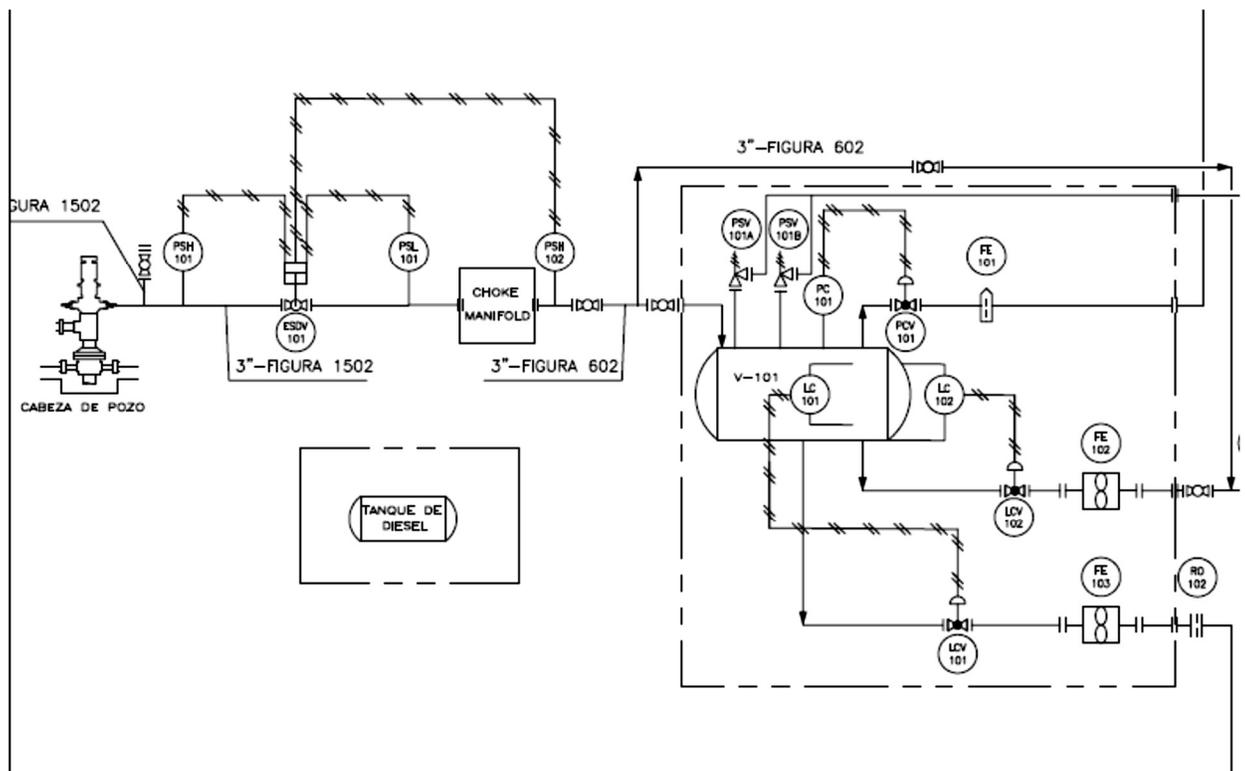
DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

18

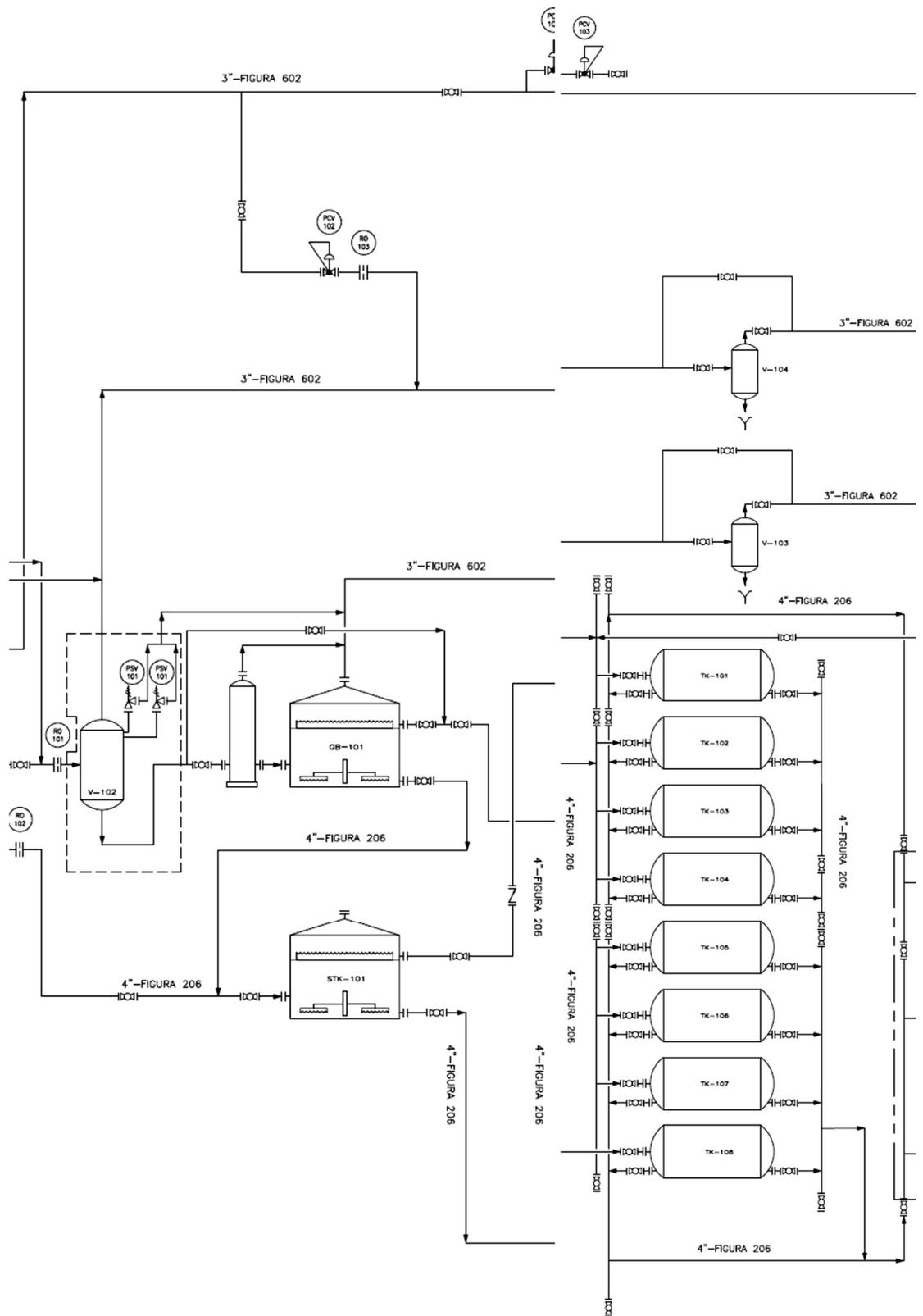
A nivel operacional la satisfacción del cliente se mide a través de un indicador que se elabora a través una encuesta al cliente al finalizar el servicio y evalúa diferentes aspectos relacionados con los equipos, la operación de los equipos, la disponibilidad de los equipos durante el servicio y la información o datos entregados.

Figura 1

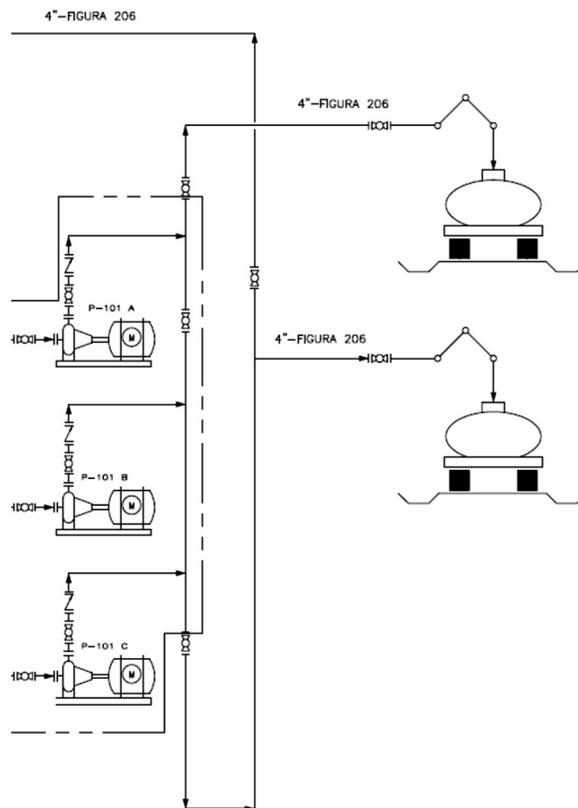
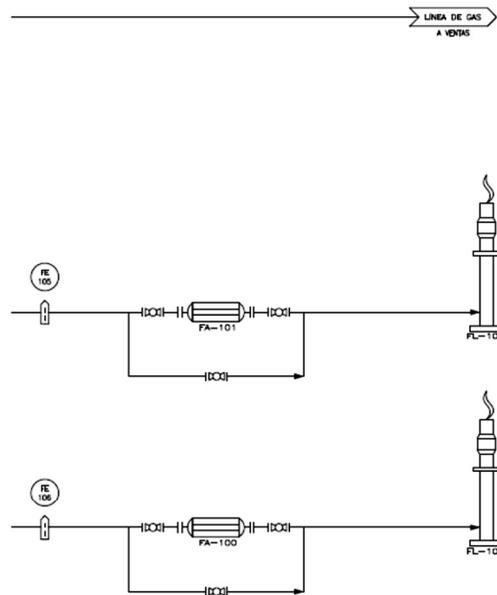
P&ID prueba extensa de producción



DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY



DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY



Tomado de Proyecto Campo Indico de SAR ENERGY.

Mantenimiento de equipos

Para una adecuada operación y servicio hacia los clientes, SAR ENERGY tiene establecidos unos planes de mantenimiento, enfocados principalmente en el mantenimiento preventivo y algunas técnicas de tipo predictivo. También se presentan mantenimientos correctivos como consecuencia de fallas inesperadas en los equipos. Con el fin de entender las diferencias de cada tipo de mantenimiento; para la norma (AENOR, Asociación Española de Normalización, 2018) UNE EN 13306 el mantenimiento es la “Combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y gerenciales durante el ciclo de vida de un ítem con el fin de mantenerlo, o restaurarlo, a un estado en el cual pueda desempeñar la función requerida”.

Según la (AENOR, Asociación Española de Normalización, 2018) UNE EN 13306, la Gestión del Mantenimiento son todas las actividades de la gestión que determinan los requisitos, los objetivos, las estrategias y las responsabilidades del mantenimiento y la implantación de dichas actividades por medios tales como la planificación del mantenimiento, el control de este y la mejora de las actividades de mantenimiento y las cuestiones económicas.

De manera que la mayor parte de los recursos se utilicen en aquellos equipos que tienen una influencia mayor; es necesario, igualmente, estudiar el consumo y el stock de repuestos y consumibles que se emplean en mantenimiento; es preciso aumentar la disponibilidad de los equipos, motivo por el cual para cumplir con este objetivo se generan los siguientes tipos de mantenimiento de acuerdo con las definiciones de la norma (AENOR, Asociación Española de Normalización, 2018) UNE EN 13306:

Mantenimiento correctivo: mantenimiento realizado luego del reconocimiento de una falla y con el fin de llevar el ítem a un estado en el cual pueda realizar una función requerida.

Mantenimiento preventivo: mantenimiento realizado en intervalos predeterminados o de acuerdo con criterios prescritos y con el fin de reducir la probabilidad de falla o la degradación de la funcionalidad del ítem.

Mantenimiento predictivo: mantenimiento basado en la condición que se efectúa realizando pronóstico derivado del análisis y la evaluación de los parámetros significativos de la degradación de un ítem.

Dentro de los indicadores más utilizados en mantenimiento encontramos los siguientes de acuerdo con la norma UNE EN 15341 (AENOR, Asociación Española de Normalización, 2018):

Tiempo Promedio para Reparar (TPPR) – Mean Time To Repair (MTTR): Es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema. Este indicador mide la efectividad en restituir la unidad a condiciones óptimas de operación una vez que la unidad se encuentra fuera de servicio por un fallo, dentro de un período de tiempo determinado.

Disponibilidad: La disponibilidad es una función que permite estimar en forma global el porcentaje de tiempo total en que se puede esperar que un equipo esté disponible para cumplir la función para la cual fue destinado. A través del estudio de los factores que influyen sobre la disponibilidad, el TPPF y el TPPR, es posible para la gerencia evaluar distintas alternativas de acción para lograr los aumentos necesarios de disponibilidad.

Utilización: La utilización también llamada factor de servicio, mide el tiempo efectivo de operación de un activo durante un período determinado.

Confiabilidad: El estudio de confiabilidad es el estudio de fallos de un equipo o componente.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

23

El área de mantenimiento de una empresa es uno de los departamentos que más se relaciona con los activos fijos a lo largo de su ciclo de vida, por esta razón, es de vital importancia que la información que se genere a partir de sus actividades sea consignada, almacenada y organizada las cuales se describen a continuación:

Procedimientos de Mantenimiento: Su objetivo es proveer al personal autorizado una guía de cómo hacer actividades de mantenimiento preventivo o correctivo y contribuir con el diseño de programas de mantenimiento.

Programa de Mantenimiento: Plan preparado con antelación donde se detalla cuando se debería realizar una tarea de mantenimiento específica.

Registro de elementos: Registro de los elementos identificados individualmente.

Historial de mantenimiento: Parte de la documentación de mantenimiento que contiene el historial de todos los datos relativos al mantenimiento de un elemento.

Inspección: Examen de la conformidad mediante medición, observación o ensayos de las características relevantes de un elemento.

Como indicadores de mantenimiento SAR ENERGY utiliza para medir su gestión el indicador de Disponibilidad; el cual evidencia el cumplimiento de los planes de mantenimiento y el cumplimiento en minimizar paradas en los equipos que afecten la producción de hidrocarburos y por consiguiente la calidad del servicio ante sus clientes.

Estado del Arte

Las etapas de operación y mantenimiento dentro del ciclo de vida de un activo son las de mayor duración y tal vez las más importantes. De acuerdo con esto, se debe analizar desde varios puntos de vista si estas etapas realmente se ejecutan de manera adecuada brindando una vida útil adecuada al activo y por consiguiente están generando valor a SAR ENERGY. Esto se puede evidenciar si se tiene algún o algunos indicadores que nos permitan concluir si estas etapas generan valor a SAR ENERGY. Adicionalmente a este análisis, se debe revisar la importancia de la operación, el mantenimiento y el talento humano como pueden afectar negativa o positivamente estas 2 etapas dentro del ciclo de vida de un activo.

Estos son solo algunos aspectos destacados del estado del arte de la gestión del mantenimiento. Es importante tener en cuenta que la disciplina sigue evolucionando constantemente, impulsada por avances tecnológicos, mejores prácticas y la búsqueda continua de la excelencia en la gestión de activos y equipos. La gestión del mantenimiento ha evolucionado a lo largo del tiempo, adaptándose a las necesidades cambiantes de las organizaciones y las tecnologías disponibles. A continuación, una breve historia de la gestión del mantenimiento.

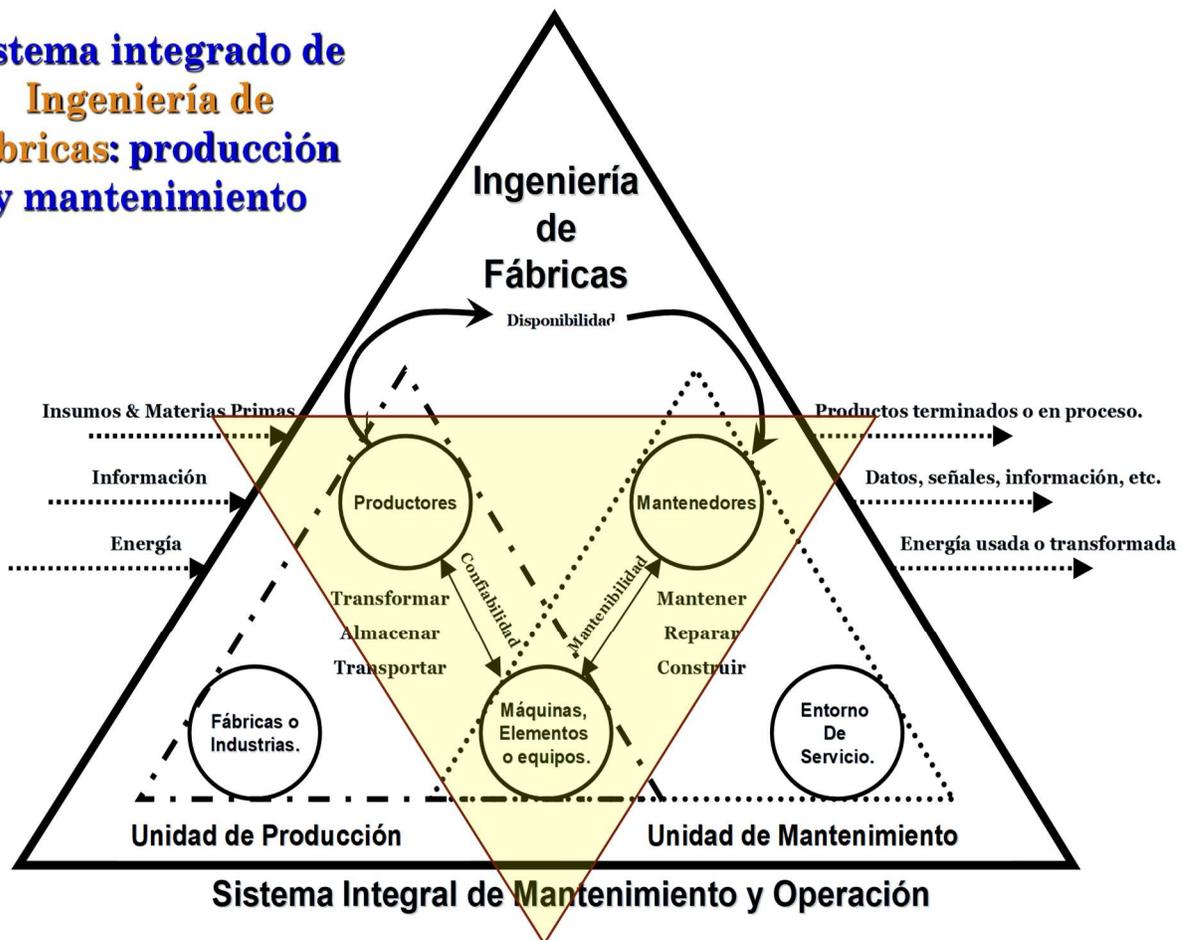
En sus inicios, el enfoque principal del mantenimiento era reparar las fallas y averías una vez que ocurrían. Esto se le conoce como mantenimiento correctivo o reactivo. A medida que las empresas buscaban evitar las averías y minimizar el tiempo de inactividad en la década de 1960, se produce una evolución hacia enfoques de mantenimiento más preventivos y planificados. Se comenzó a reconocer que el mantenimiento correctivo tenía desventajas, como tiempos de inactividad no planificados, costos de reparación elevados y posibles impactos negativos en la producción y la calidad. Mientras el concepto de mantenimiento predictivo comenzó a desarrollarse en la década de 1960 y se basó en gran medida en el uso de tecnologías de monitoreo y diagnóstico. En sus primeras etapas, se utilizaron principalmente

técnicas de análisis de vibraciones para evaluar el estado de los equipos y predecir posibles fallas. A mediados de la década de 1970, el concepto de mantenimiento proactivo se expandió y evolucionó con el advenimiento de la tecnología informática y el uso de sistemas de gestión de mantenimiento asistidos por computadora (CMMS⁴). En 1978, el ingeniero John Moubray (Moubray, 1997), presentó formalmente la metodología RCM, basó su trabajo en la investigación y la experiencia práctica en la industria aeroespacial y adaptó los principios del RCM para su aplicación en otros sectores, como el manufacturero y el de servicios públicos.

Figura 2

Sistema Kantiano CMD

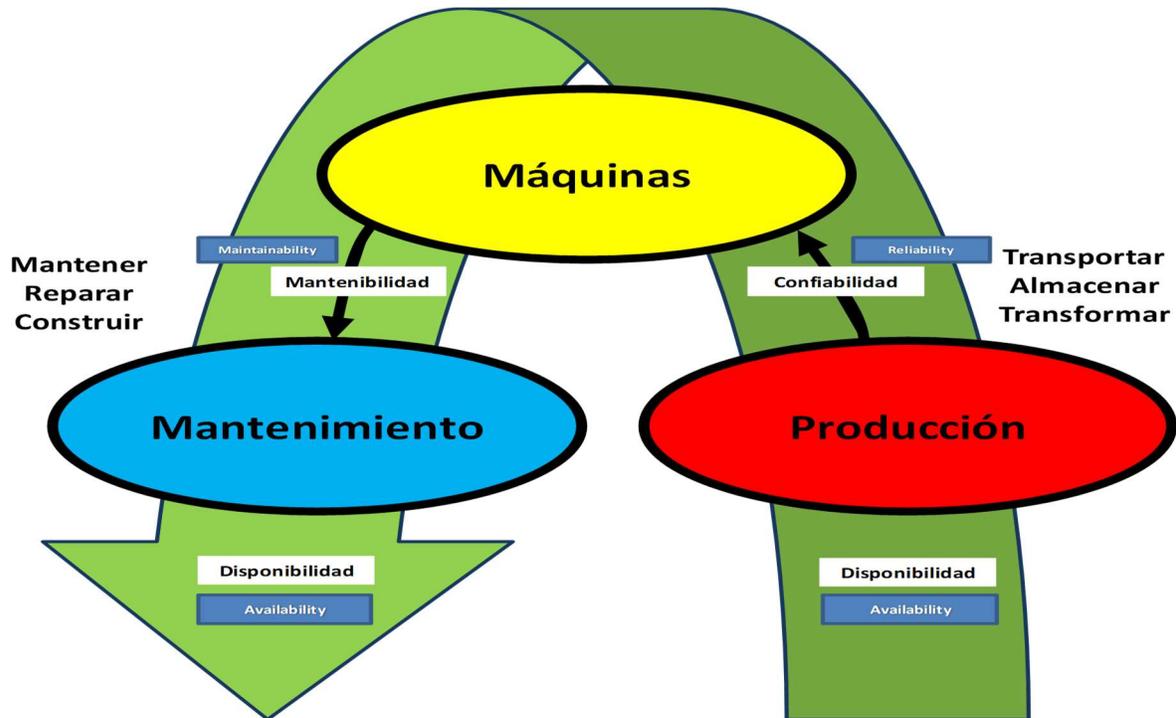
Sistema integrado de Ingeniería de fábricas: producción y mantenimiento



⁴ CMMS Computer Management maintenance System

Figura 3

Sistema Kantiano CMD



Nota: enfoque sistémico kantiano (Grant R. M., Generación de ventajas competitivas con análisis estratégico, 2016) (Arango y otros, 2011) (Mora A. -G., Mantenimiento estratégico Industrial, 2007).

R. Keith Mobley (Mobley, 2014), discuten los diferentes enfoques de mantenimiento, como el mantenimiento correctivo, el mantenimiento preventivo y el mantenimiento predictivo, junto con sus ventajas y desventajas. También se presenta el concepto de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) y su aplicación en la toma de decisiones de mantenimiento. Lindley R. Higgins (Higgins, 2008), cubre una amplia gama de temas técnicos, como el mantenimiento preventivo, el mantenimiento predictivo, el mantenimiento correctivo, el análisis de fallas y los métodos de diagnóstico, la lubricación y los sistemas de sellado, la gestión de la

corrosión y el desgaste, la gestión de la vibración y el equilibrado, y la gestión de la alineación y el ajuste de maquinaria.

Estos son solo algunos de los enfoques y metodologías clave en la historia de la gestión del mantenimiento. Es importante tener en cuenta que cada organización puede adaptar y combinar estos enfoques según sus necesidades específicas.

En la historia se ha buscado los enfoques más avanzados y eficaces para medir y evaluar el rendimiento del mantenimiento. A continuación, se presentan algunos aspectos clave que representan el estado actual de los indicadores de mantenimiento, para Richard D. Palmer (Palmer, 2013) los KPIs⁵ no son el enfoque principal, aborda su implementación y uso como una herramienta clave en la gestión del mantenimiento, así como James V. Reyes-Picknell, J. D. Campbell (JHON D. CAMPBELL, 2016), también exploran la gestión del rendimiento en el mantenimiento; cómo establecer indicadores clave de rendimiento (KPIs) para medir y monitorear el desempeño de los activos y los equipos de mantenimiento. R. Keith Mobley (Mobley, 2014), discute los aspectos fundamentales de la gestión del rendimiento del mantenimiento, incluyendo la medición y seguimiento de indicadores clave de rendimiento, el análisis de datos y la toma de decisiones basada en datos. Se presentan conceptos como el costo del ciclo de vida, el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR).

Entre los indicadores más representativos en la historia del mantenimiento encontramos los siguientes:

1. Indicadores de Disponibilidad: Los indicadores de disponibilidad evalúan la capacidad de los activos para estar disponibles y operativos cuando se necesitan.

⁵ *KPI Keyboard Performance Indicators*

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

28

2. Indicadores de Fiabilidad: Los indicadores de fiabilidad miden la capacidad de los activos para funcionar sin fallas o interrupciones durante un período de tiempo determinado. Algunas métricas comunes incluyen la tasa de fallas, el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR).

3. Indicadores de Mantenibilidad: Los indicadores de mantenibilidad evalúan la facilidad y eficiencia con la que se puede mantener y reparar un activo en caso de una falla. Estos indicadores incluyen el tiempo medio de reparación (MTTR), el tiempo de respuesta del mantenimiento y la efectividad del mantenimiento correctivo.

4. Indicadores de Costo del Mantenimiento: Estos indicadores miden los costos asociados con las actividades de mantenimiento. Además de los costos directos de mano de obra y materiales, se pueden considerar costos indirectos como los costos de tiempo de inactividad, los costos de repuestos y los costos de oportunidad.

5. Indicadores de Productividad del Mantenimiento: Estos indicadores evalúan la eficiencia y efectividad del departamento de mantenimiento. Pueden incluir métricas como la relación entre el tiempo de mantenimiento planificado y el tiempo total de mantenimiento, la relación entre el tiempo de reparación y el tiempo de mantenimiento y la tasa de cumplimiento de los planes de mantenimiento.

6. Indicadores de Seguridad y Salud Ocupacional: Estos indicadores evalúan el desempeño de seguridad y salud ocupacional del departamento de mantenimiento. Pueden incluir métricas como el número de incidentes de seguridad, la frecuencia de lesiones y la tasa de cumplimiento de los protocolos de seguridad.

Es importante tener en cuenta que los indicadores de mantenimiento pueden variar según la industria, el tipo de activo y los objetivos específicos de la organización. La selección de los indicadores adecuados depende de la estrategia y los requisitos de medición de cada empresa.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

29

Dentro del sector hidrocarburos para el área de producción se manejan diferentes tipos de indicadores, de acuerdo con Ortiz Buitrago, V., & Pardo López, H. F. (Ortiz Buitrago, 2021) se utilizan entre otros los indicadores de INYECCIÓN NO CONFORME, POZOS CUMPLIENDO CON CAPACIDAD DISPONIBLE, PORCENTAJE DE PRODUCCIÓN DIFERIDA, CUMPLIMIENTO DEL PRONOSTICO OPERATIVO DE PRODUCCION, COSTO DEL UPSTREAM. Para el caso de servicios prestados por la empresa SAR ENERGY el indicador más aplicable es el de porcentaje de producción diferida que define así:

Porcentaje de producción diferida: Este indicador mide la desviación porcentual entre la producción diferida de crudo reportada y la producción de curso real medida el último día de cada mes. Su objetivo es mostrar la gestión de la producción que está impactando el logro de metas de producción de hidrocarburo o costo de levantamiento. Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de diferidas en producción} = \text{Producción} \frac{\text{diferida}}{\text{Potencial}} \text{de producción}$$

Ecuación 1

Producción diferida

$$\text{Porcentaje de producción diferida} = \frac{\text{Producción diferida}}{\text{Potencial de producción}}$$

Ecuación 2

Efectividad y LCC en mantenimiento

$$LCC = \sum_0^T \frac{1}{(1+r)^n} * C(n), \text{ donde}$$

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

30

r es la tasa de descuento o rata de interés

C (n) es el costo en el año n.

T es la vida útil en años

Fórmula Magna Suprema Máxima y Única de Mantenimiento

*Eficiencia = Confiabilidad * Mantenibilidad * Disponibilidad * Capacidad utilizada*

$$\text{Efectividad del sistema} = \frac{\text{Eficiencia}}{\text{LCC}} = \frac{C * M * D * K}{\text{LCC}}$$

LCC = Life Cycle Cost

K = Capacidad utilizada

Nota: (Barringer@, 2005)

Aunque para la producción de hidrocarburos se tienen varios indicadores, no se observa alguno que esté relacionado con el valor que generan a los activos a través de una adecuada operación. Los indicadores de efectividad son los indicadores supremos de mantenimiento y operación, incluido el sector petrolero, son universales.

Contar con el talento humano adecuado, capacitado y comprometido puede marcar la diferencia en la eficacia y el éxito de las estrategias de mantenimiento de una organización; R. Keith Mobley (Mobley, 2014) aborda temas relacionados con la gestión del personal de mantenimiento, incluyendo la formación, el desarrollo de habilidades; la seguridad, salud ocupacional; la motivación y retención del personal. Se discuten estrategias para construir y gestionar un equipo de mantenimiento altamente efectivo que buscan mejorar la eficiencia y efectividad de sus operaciones de mantenimiento.

Para García Palencia O., (García, 2012), menciona la confiabilidad del talento humano como la probabilidad de desempeño eficiente y eficaz, de las personas, dentro de un contexto organizacional específico durante su competencia laboral. El sistema de confiabilidad humana

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

31

incluye varios elementos de proyección personal que permiten optimizar los conocimientos, competencias, habilidades, aptitudes, actitudes y destrezas de los miembros de una organización con la finalidad de generar capital intelectual. El análisis del talento humano permite determinar los requerimientos y los perfiles requeridos, así como las competencias y las actitudes necesarias de las personas para cada puesto de trabajo.

El talento humano desempeña un papel esencial en la gestión del mantenimiento, ya que influye en la eficiencia operativa, la toma de decisiones, la participación en actividades de mantenimiento, la mejora continua y la seguridad en el entorno de trabajo.

Es así como para las etapas del ciclo de vida del activo (operación y mantenimiento) es importante el talento humano; el tener personal con la suficiente competencia para desarrollar la labor y así mismo, que desde el área de talento humano se tenga un plan de fortalecimiento de competencias de este personal.

La gestión de compras y la gestión financiera son fundamentales para asegurar la disponibilidad de repuestos a lo largo del ciclo de vida de un activo. Trabajando de la mano, estas áreas garantizan una adquisición eficiente y oportuna de repuestos, la optimización del inventario y la toma de decisiones basada en el análisis de costos y beneficios. Esto contribuye a mantener los activos en funcionamiento y minimizar el tiempo de inactividad no planificado.

Richard D. Palmer (Palmer, 2013), analiza el proceso de estimación de los recursos necesarios para llevar a cabo las tareas de mantenimiento, tomando en conjunto la mano de obra, los materiales y las herramientas requeridas.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

32

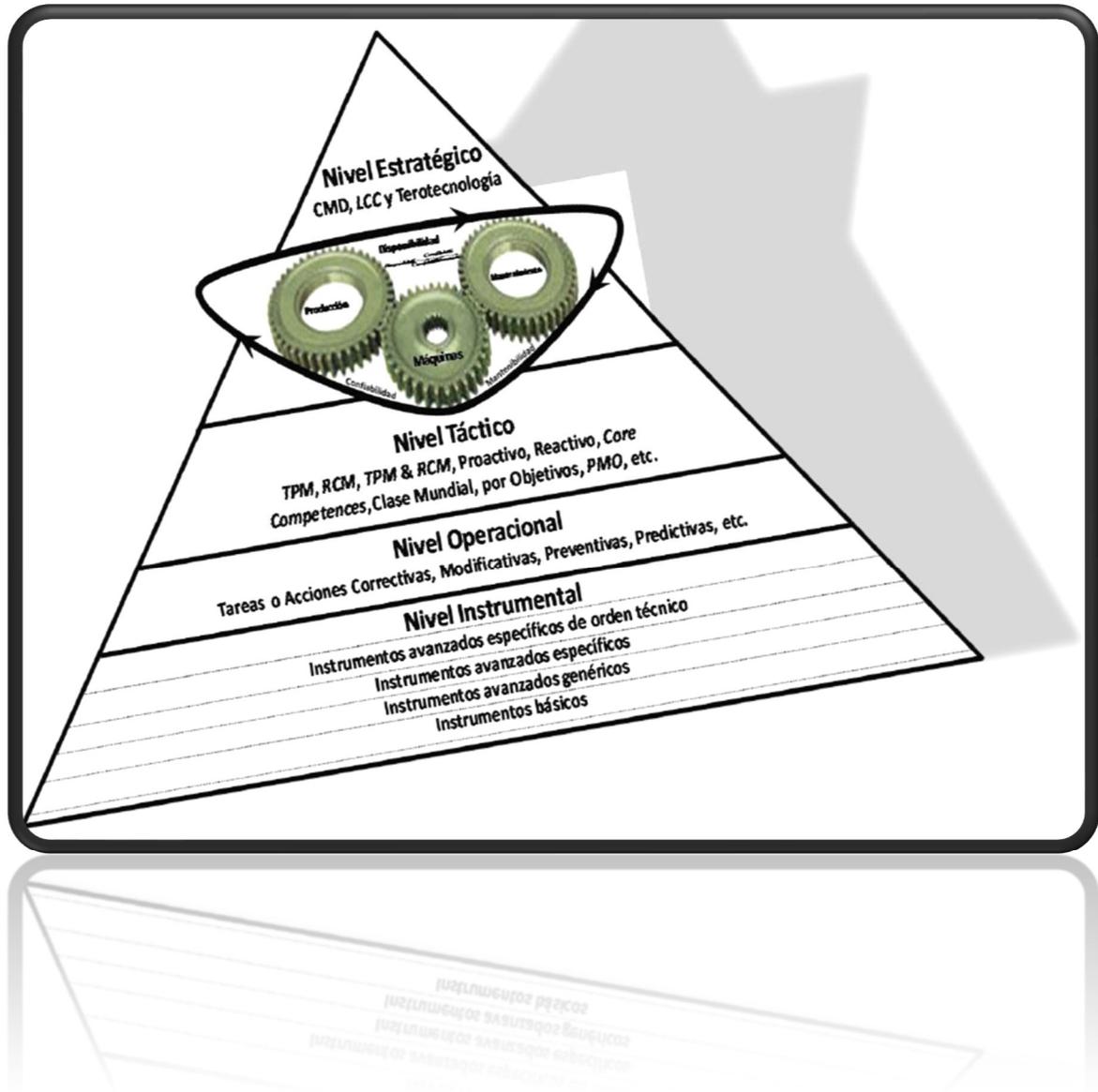
También se ofrecen recomendaciones para la gestión eficaz del inventario de repuestos y la gestión de proveedores. Campbell, Reyes (Campbell, Reyes-Picknell, & Kim, 2015), abordan aspectos clave de la gestión de activos, incluyendo la evaluación de la criticidad de los activos, la gestión de la vida útil, la gestión de repuestos y el análisis de costos del ciclo de vida.

Se proporcionan herramientas y enfoques prácticos para optimizar la gestión de los activos físicos de una organización. Así mismo, Lindley R. Higgins (Higgins, 2008), aborda diferentes aspectos de la gestión del mantenimiento, incluyendo la planificación y programación de mantenimiento, la gestión de activos, la gestión del inventario de repuestos; la gestión del riesgo, confiabilidad; la gestión del rendimiento del mantenimiento. Se exploran estrategias y técnicas para optimizar la eficiencia y la efectividad de las operaciones de mantenimiento.

Actualmente, a pesar de que la economía, las industrias y el mundo globalizado mide todo, no existe un indicador claro que permita identificar la generación de valor durante el ciclo de vida útil de los activos en las etapas de operación y mantenimiento; esto, a pesar de que se utilizan muchos indicadores relacionados con el mantenimiento y la operación Campbell, Reyes (Campbell, Reyes-Picknell, & Kim, 2015). Por esta razón, se debe analizar de acuerdo con el modelo de negocio y la actividad que desarrolla actualmente SAR ENERGY el indicador más adecuado para evidenciar como se genera valor desde los activos en las etapas de operación y mantenimiento.

Así mismo, el talento humano es importante dentro de estas etapas del ciclo de vida útil del activo, el cual debe tener un proceso desde la contratación y establecer un plan de capacitación que permita mantener las competencias del personal, lo que seguramente afectara de manera positiva la gestión de activos y el valor de SAR ENERGY.

Figura 4 - Niveles estratégicos de mantenimiento operación y máquinas



Nota: Los niveles estratégicos de mantenimiento, operación y máquinas son fundamentales para garantizar un rendimiento óptimo de los activos y maximizar su vida útil.

Tomado de Tácticas de Mantenimiento de Luis A. Mora.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

**34
Metodología**

	ETAPAS				
	1	2	3	4	5
1	REVISION DOCUMENTAL DE LISTADO DE ACTIVOS Y DELIMITACION DE ACTIVOS				
2	Revisión documental de taxonomía de activos	IDENTIFICACION DE INDICADORES UTILIZADOS POR SAR ENERGY EN LAS AREAS DE			
3	Verificación de inventario de activos físicos operativos	Revisión documental de indicadores utilizados por SAR ENERGY dentro de sus procesos	DEFINIR LA ESTRATEGIA PARA LA MEDICION DE INDICADORES EN LAS ETAPAS DE O&M DE LOS ACTIVOS		
4	Revisión de criticidad de activos y/o elaboración de criticidad de activos	Conclusiones basados en la revisión documental	Análisis de indicadores existentes para las etapas O&M disponibles en la industria.	ANALISIS DE CAPACITACIONES PARA EL PERSONAL DE O&M RELACIONADOS CON LA GESTION DE ACTIVOS	
5			Conclusiones	Revisión de historial de capacitaciones para el personal de O&M relacionados con activos	PROPUESTA DE INDICADORES PARA MEDIR LA GESTION DE ACTIVOS EN LA ETAPAS DE O&M QUE MUESTRE GENERACIÓN DE VALOR
					Propuesta de indicadores
					Conclusiones

Para la ejecución de cada etapa se establecerá una metodología de la siguiente manera:

Etapas 1. Revisión documental de listado de activos y delimitación de activos.

De acuerdo a la taxonomía de activos vigente y que SAR ENERGY utiliza para el plan de mantenimiento; se realizara un análisis teniendo en cuenta la criticidad de los activos dentro de la operación, el historial de fallas de los equipos que afecten la operación para así delimitar los activos a los cuales se les realizara el análisis.

Etapa 2. Identificación de indicadores utilizados por SAR ENERGY en las áreas de Operación y Mantenimiento.

De acuerdo al sistema de gestión de calidad (SGI), SAR ENERGY tiene establecidos indicadores para las áreas de Operación y Mantenimiento de manera independiente.

En esta etapa, se analizarán los indicadores actuales y se concluirá si estos indicadores muestran el valor que generan los activos en estas etapas; este análisis será ejecutado teniendo en cuenta las recomendaciones de la norma UNE 15341.

Etapa 3. Definir la estrategia para la medición de indicadores en las etapas de Operación y Mantenimiento de los activos.

Luego de hacer un análisis y concluir la relación de los indicadores actuales establecidos en SAR ENERGY para las etapas de Operación y Mantenimiento con respecto a los activos se definirá la estrategia a implementar para la elaboración y ejecución de los indicadores que muestren el valor que agregan estas etapas en los activos.

Etapa 4. Análisis de las capacitaciones para el personal de Operación y Mantenimiento relacionados con la gestión de activos.

En esta etapa se pretende desarrollar un análisis del historial de capacitaciones tomadas por el personal de Operación y Mantenimiento; durante los 3 últimos años; dentro de este historial analizar cuáles de estas capacitaciones están relacionadas con la gestión de activos. Se elaborará una estadística, en cual se evidenciará la relación de estas capacitaciones con la gestión de activos.

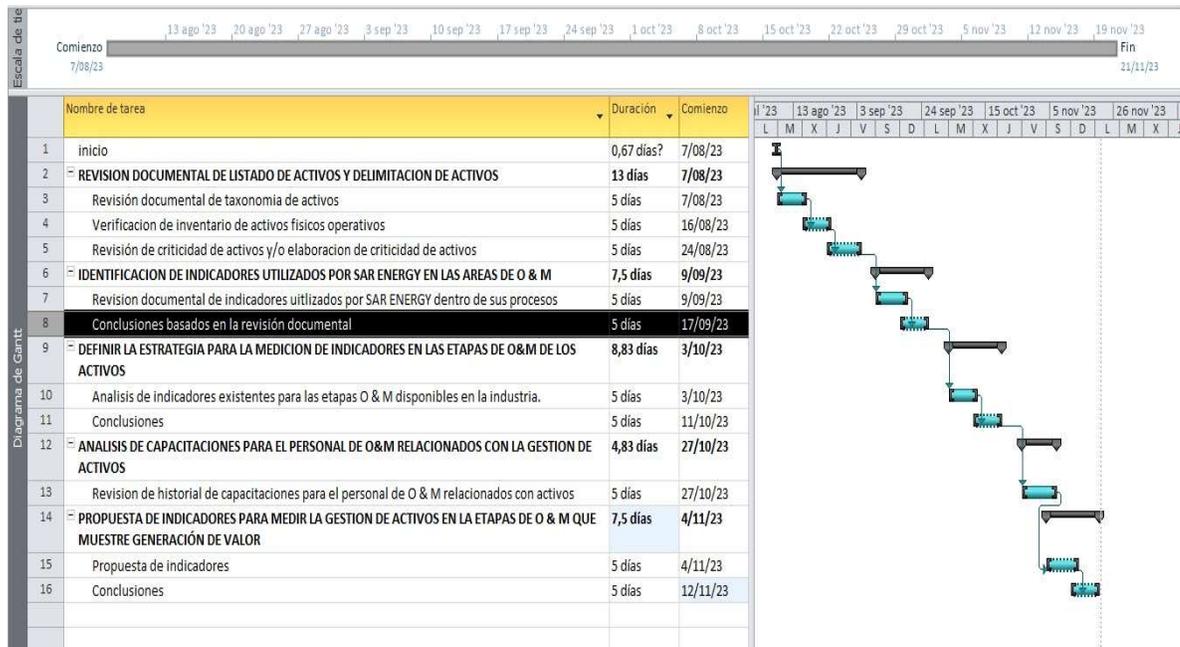
Etapa 5. Propuesta de indicadores para medir la gestión de activos en las etapas de Operación y Mantenimiento que muestre generación de valor.

Luego de realizado el estudio y análisis de las 4 etapas anteriores se realizará una propuesta de indicadores para que SAR ENERGY la implemente. Así mismo, posterior a este análisis se elaborarán unas conclusiones y recomendaciones de acuerdo al estudio ejecutado.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

36

Cronograma de actividades



Resultados esperados

Como resultado, se espera entregar una propuesta de indicadores a SAR ENERGY para una adecuada gestión de activos en las etapas de mantenimiento y operación en el ciclo de vida del activo; esto, puede generar valor a la compañía y por eso es importante establecer mediciones que no se limiten al cumplimiento sino adicionalmente la generación de valor. Esto, es posible evidenciarlo en reducción de costos, incremento de eficiencia, maximizar la vida del activo, mejorar la calidad del producto, entre otros métodos.

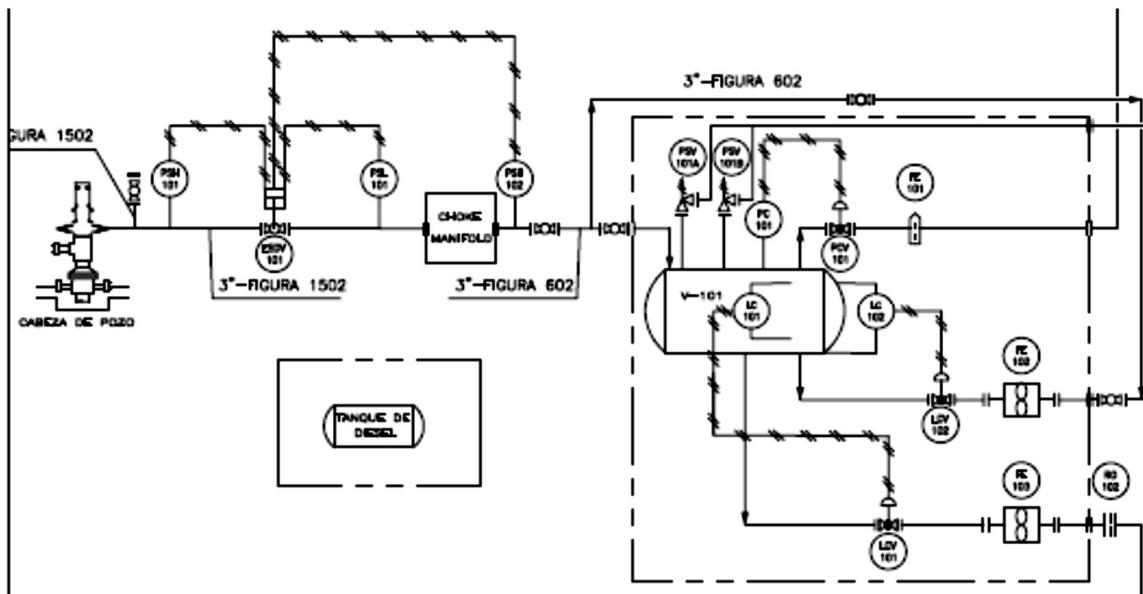
Desarrollo técnico

Dentro de la realización de los diferentes proyectos que ejecuta SAR ENERGY, el principal o más importante son las pruebas extensas de pozo o denominadas “facilidades tempranas”.

Etapas 1. Revisión documental de listado de activos y delimitación de activos

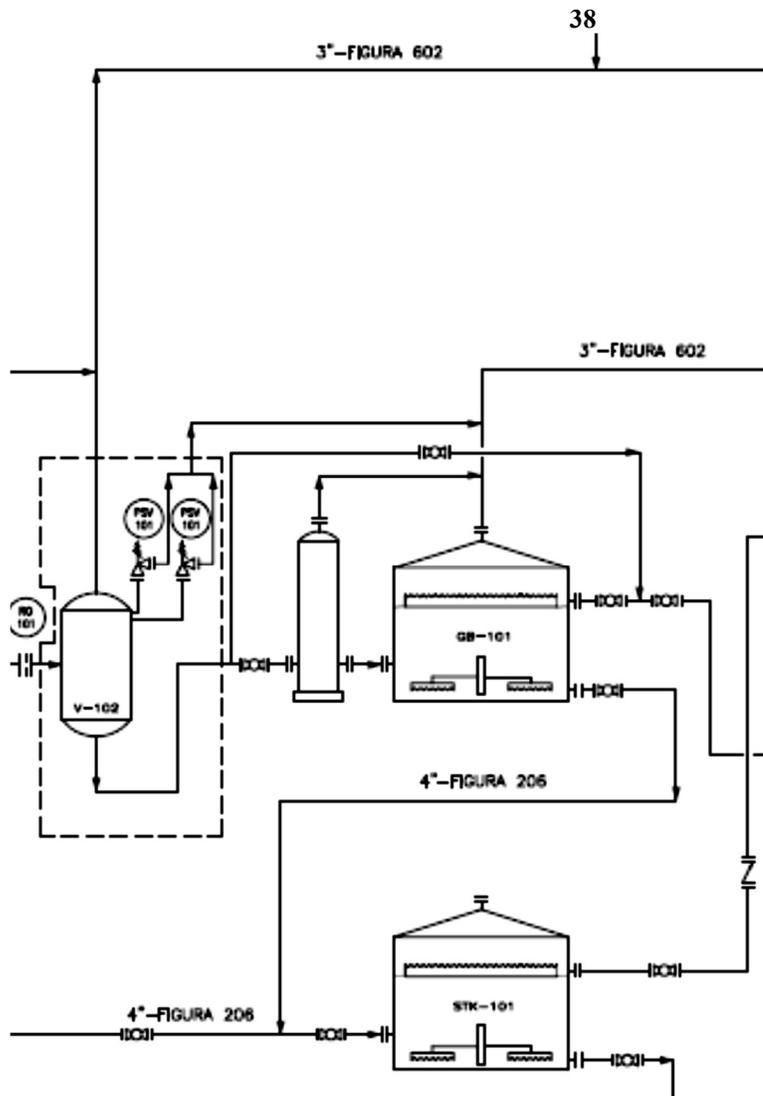
En la ejecución de este tipo de proyectos SAR ENERGY cuenta con una flota de equipos que son designados de acuerdo a las necesidades del cliente. Para el caso de análisis de esta monografía se tendrá en cuenta el proyecto “Indico”.

Mediante la elaboración de un P&ID⁶, se definen los equipos que ejecutaran el proyecto.



⁶ P&ID: Process and Instrument Diagram (Diagrama de procesos e instrumentación)

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY



DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

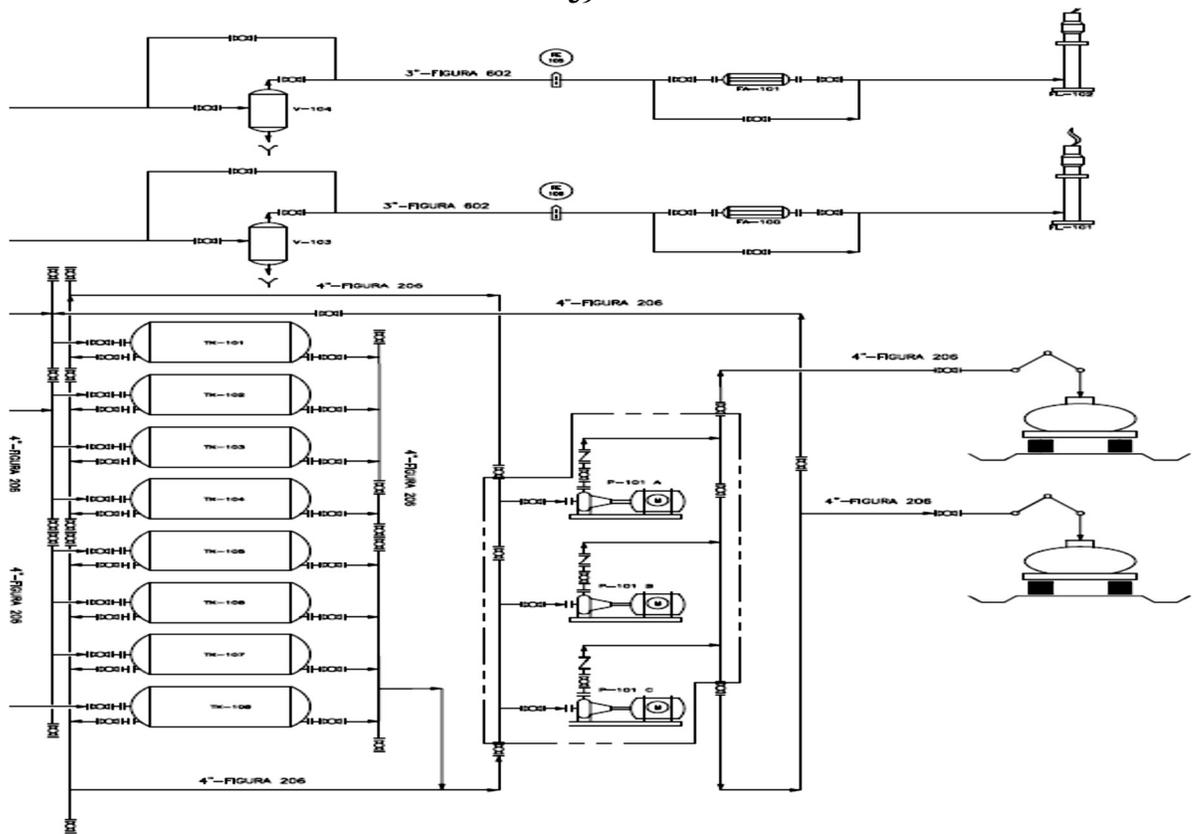
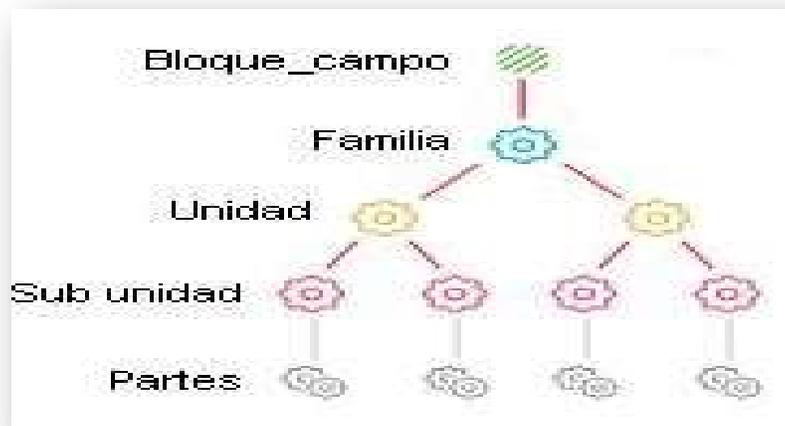


Figura 5 - P&ID Proyecto Indico.

Tomado de Proyecto Campo Indico de SAR ENERGY.

Definiendo los equipos a formar parte del proyecto se elabora la taxonomía de equipos.



DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

40

Figura 6 - Taxonomía de equipos SAR ENERGY.

Tomado de Plan de Mantenimiento de SAR ENERGY.

Tabla 2 - Listado equipos proyecto Indico.

Familia	Equipo Padre / Unidad	Código Equipo Padre	Equipo Principal / Sub Unidad Principal	Código Equipo Auxiliar / Sub Unidad	Equipos Secundarios / Sub Unidad Auxiliar	Código Equipo Auxiliar / Sub Unidad Auxiliar	Parte de equipo / Parte Sub unidad (Codigo)
BOMBAS	Bombas Desplazamiento Positivo	BDP	Bomba Reciprocante	PURE	Motor Diésel	CEDE	Válvula de seguridad (PSV) Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (TI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)
			Bomba De Paletas	PLVE	Motor Eléctrico	EMAC	Válvula de seguridad (PSV) Indicador de presión (PI)
			Bomba De Engranaje	PUGE	Motor Eléctrico	EMAC	Válvula de seguridad (PSV) Indicador de presión (PI)
	Bombas Centrifugas	BCF	Bombas Centrifugas	PLCE	Motor Diésel	CEDE	Indicador de presión (PI)
	Bombas Neumáticas	BNE	Bombas Neumáticas	PLNE	Motor Eléctrico	EMAC	
GENERADORES	Generadores Eléctrico	GEN	Generador Con Motor (Ej. Motor Diésel / Gas)	EGMD	Motor De Combustión A Diésel Motor De Combustión A Gas Cabinas Insonorizadas	CEDE CEGE BOSO	
	Planta Estadio	PES	Generador Con Motor (Ej. Motor Diésel / Gas)	EGMD	Motor De Combustión A Diésel Torre De Iluminación	CEDE ILTO	
TABLEROS	Tableros Distribución Y Control Eléctrico	TDE	Tableros Distribución Y Control Eléctrico	TASW	Transformador Bañados En Aceite Transformador Secos Blower (moto-ventilador)	PTOT PTDT BLOW	Arrancador suave (ARS) Arrancador directo (ARD)
			Variador De Velocidad	SDAC	Blower (moto-ventilador)	BLOW	
			Tableros Eléctricos De Control	TACO			
COMPRESORES	Compresores De Gas	COG	Compresores Recíprocos	CORE	Motor De Combustión A Diésel	CEDE	Válvula de seguridad (PSV) Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (TI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)
					Motor De Combustión A Gas	CEGE	
					Motor Eléctrico	EMAC	
			Tanque Acumulador	VEAC			
			Motor De Combustión A Diésel	CEDE	Válvula de seguridad (PSV) Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (TI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)		
	Compresores De Aire	COA	Compresores Tomillo	COSC	Motor De Combustión A Gas	CEGE	
					Motor Eléctrico	EMAC	
					Tanque Acumulador	VEAC	
			Motor De Combustión A Diésel	CEDE	Válvula de seguridad (PSV) Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (TI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)		
			Compresores Centrifugos	COCE	Motor De Combustión A Diésel Motor De Combustión A Gas Motor Eléctrico Tanque Acumulador	CEDE CEGE EMAC VEAC	Indicador de presión (PI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)
VASOS	Separador	SEP	Separador	VESE			Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (PI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)
			Scrubber	VESE			Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (PI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)
	Tanque De Almacenamiento	TKA	Tanque Vertical	VEVE			Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (PI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)
			Tanque Horizontal	VEHO			Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (PI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)
			Tanque De Almacenamiento De Diésel	VEDI			Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (PI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)
			Frac Tank	VEFT			Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (PI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)
			Cash Tank	VECT			Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (PI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)
	Tanque De Medición	TKM	Gauge Tank	VEGT			Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (PI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)
	Tanque De Tratamiento	TKT	Skimming Tank	VEST			Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (PI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)
			Gun Barrel	VESB			Indicador de presión (PI) Indicador de temperatura (PI) Indicador de nivel (LG) Switch x alto (variable +SH) Switch x bajo (variable +SL)

De acuerdo al listado de equipos designados para el proyecto se propone un análisis de criticidad de equipos para establecer los equipos que deben ser objeto de este análisis.

**DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN
Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY**

41

Los equipos considerados por SAR ENERGY como críticos para el proceso se relacionan a continuación:

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

42

Tabla 3 - Listado equipos principales Proyecto Indico.

Familia	Equipo Padre / Unidad	Código Equipo Padre	Equipo Principal / Sub Unidad Principal
			
BOMBAS	Bombas Desplazamiento Positivo	BDP	Bomba Reciprocante
			Bomba De Paletas
			Bomba De Engranaje
	Bombas Centrifugas	BCF	Bombas Centrifugas
Bombas Neumáticas	BNE	Bombas Neumáticas	
GENERADOR	Generadores Eléctrico	GEN	Generador Con Motor (Ej. Motor Diésel / Gas)
COMPRESORES	Compresores De Aire	COA	Compresores Recíprocos
			Compresores Tornillo
			Compresores Centrifugos
VASIJAS	Separador	SEP	Separador
			Scrubber
	Tanque De Almacenamiento	TKA	Tanque Vertical
			Tanque Horizontal
			Tanque De Almacenamiento De Diésel
			Frac Tank
		Cash Tank	

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

Para la realización de este análisis de criticidad se propone una matriz enfocada en los aspectos ambiental, financiero y seguridad. A continuación, se relacionan los criterios a tener en cuenta en este análisis:

Tabla 4 - Valoración de criticidad

VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Puntaje	Descripción	Seguridad	Medioambiente	Finanzas
16	Catastrófica	Muerte	Daño de alcance municipal	Costo o pérdida equivalente mayor o igual \$500'000.000
8	Mayor	Incapacidad permanente	Daño por fuera de la instalación	Costo o pérdida equivalente entre \$100'000.000 y el \$500'000.000
4	Media	Incapacidad temporal	Daño contenido en la instalación	Costo o pérdida equivalente entre \$10'000.000 y el \$100'000.000
2	Menor	Primeros auxilios	Daño contenido en el equipo	Costo o pérdida equivalente entre \$1'000.000 y el \$10'000.000
1	Mínima	Sin lesión	Ningún daño	Costo o pérdida equivalente inferior a \$1'000.000

Nota: Se valoran consecuencias en seguridad, medio ambiente y financiero.

Tabla 5 - Valoración de probabilidad

VALORACIÓN DE PROBABILIDAD		
Puntaje	Descripción	Parámetro
5	Muy alta/Muy frecuente	Una o varias fallas por semana
4	Alta/ Frecuente	Una a tres fallas por mes
3	Media/Ocasional	Una a diez fallas por año
2	Baja/Remota	Una a cuatro fallas en 5 años
1	Muy baja/Improbable	Una a tres fallas en 20 años

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

Tabla 6 - Matriz de criticidad

		MATRIZ DE CRITICIDAD				
PROBABILIDAD	5	5	10	20	40	80
	4	4	8	16	32	64
	3	3	6	12	24	48
	2	2	4	8	16	32
	1	1	2	4	8	16
		1	2	4	8	16
		CONSECUENCIA				

Tabla 7 - Criticidad por colores

DESCRIPCIÓN	
COLOR	CRITICIDAD
	Muy Alta
	Alta
	Media
	Baja

Etapa 2. Identificación de indicadores utilizados por SAR ENERGY en las áreas de operación y mantenimiento.

Para SAR ENERGY en la actualidad el indicador medible para el área de mantenimiento es la disponibilidad de equipos. Para entender acerca de este tipo de indicador se debe entender el concepto.

Disponibilidad Alcanzada - D_A

A_A , es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente, cuando se requiere en cualquier tiempo bajo condiciones de operación normales y en un entorno ideal de soporte logístico, sin considerar ningún retraso logístico o administrativo, pero involucra en sus cálculos, los tiempos imputables a las actividades planeadas de mantenimiento, aparte de las acciones correctivas que ya trae desde la Inherente o Intrínseca.

Cuando se presente el caso especial de que durante la realización de una tarea proactiva o planeada (preventiva o predictiva) aparezca un daño que implique una reparación (o viceversa), se debe tomar la corrección (o modificación) como un evento independiente y considerarse los dos tiempos en forma aislada (Díaz, 1992), debido a que la reparación requiere de horas-hombre adicionales a las el mantenimiento preventivo, se puede manejar como un tiempo correctivo entre dos preventivos o simplemente tomar un preventivo por el tiempo invertido y otro correctivo o modificativo por la acción no planeada (o viceversa si se presenta o superpone un planeado, durante la ejecución de un correctivo o modificativo), pero en todo caso asumir los tiempos planeados y no planeados, en forma separada contabilizándolos por aparte, si se presentan en el mismo instante de tiempo.

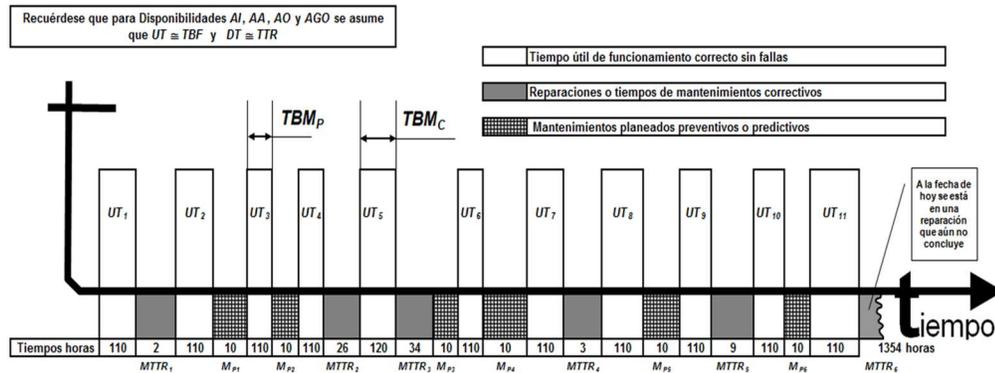
Recuérdese que en confiabilidad los tiempos útiles son inherentes al equipo o sistema, mientras que en mantenibilidad los tiempos de reparaciones o de tareas proactivas son inherentes al recurso humano⁷ que las realiza.

⁷ O grupos de personas que realizan las correcciones, modificaciones y/o las tareas proactivas.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

A manera de ejemplo, se presenta el siguiente caso, donde los tiempos medios se valoran en forma puntual y no con simulaciones de distribuciones (que se desarrolla más adelante) que es lo que recomienda el autor. Recuérdese que en la Disponibilidad Alcanzada⁸ prepondera la importancia de los mantenimientos planeados y los no planeados que se tienen desde Inherente.

Figura 7 - Disponibilidad Alcanzada



Una vez se configura la situación real de todos los parámetros de cálculo, como todos los UT , los $MTTR$ y los M_P , se procede a elaborar dos gráficos, uno para los cálculos con acciones de mantenimiento no planeado (correctivos y/o modificativos) y, otro gráfico independiente con los mantenimientos planeados, cada uno solo con sus valores planeados o no, donde se mantienen en ambos casos los UT o $MTBF$.

El siguiente paso es separar los dos mapas: no planeado y planeados.

⁸ Achieved Availability, en inglés. En castellano se le denomina Disponibilidad Alcanzada

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

48

Si se tienen en cuenta los tiempos logísticos y administrativos de demoras, en la gestión del mantenimiento y en la operación de equipos, antes o después de una intervención correctiva o planeada, se debe considerar la disponibilidad operacional, que se expresa mediante:

Ecuación 4

Disponibilidad Operacional - D_O - A_O

$$\text{Disponibilidad Operacional} = A_O = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}}$$

Donde $MTBM = \text{Mean Time Between Maintenance}$ es el Tiempo Medio entre Mantenimientos y se calcula igual que en la anterior D_A Disponibilidad Alcanzada tanto para reparaciones correctivas como para mantenimientos planeados, en este elemento no inciden para nada: ADT , LDT' ni LDT . Ya que los cambios en la fracción no se dan en el numerador que es la confiabilidad, solo afecta el denominador en la mantenibilidad, pues incrementa los $MTTR$ y/o los M_P , en función de donde se presenten los ADT , los LDT' y los LDT , que \overline{M} aumentan los $MTTR$ y los M_P .

El \overline{M} (que incluye los $LDT = ADT^{10} + LDT'^{11}$) se calcula exactamente igual que el , solo que al momento de calcular el $MTTR$ no solo se toman los correspondientes $TTR_1, TTR_2, \dots, TTR_n$ netos, sino que se le suman respectivamente sus LDT pertinentes a cada una de las reparaciones. Al igual al momento de calcular el M_P se le debe sumar a cada tiempo de mantenimiento planeado su respectivo LDT en caso de existir. Casi siempre las demoras ocurren antes del evento de mantenimiento, por eso por lo general se le suma al evento que continua de la acción de mantenimiento en el tiempo posterior o seguido; en algunas ocasiones

⁹ A_O – Operational Availability en inglés y en castellano es la Disponibilidad Operacional.

¹⁰ ADT , son los tiempos de demora administrativa.

¹¹ LDT , son los tiempos logísticos de demora para la realización de mantenimiento o reparación.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

49

ocurren demoras después de la acción de mantenimiento y antes de poner en marcha el equipo, en estos casos se le contabiliza a mantenimiento en sus respectivos $MTTR$ o M_p y se le imputa a producción.

$$\overline{M}' = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

(Mora, 2007a)

Ambos valores se calculan exactamente igual que en la Disponibilidad Alcanzada.

Etapas 3. Estrategia para la medición de indicadores en las etapas de O&M de los activos.

Dentro de los indicadores evaluados en SAR Energy encontramos el cumplimiento de la Programación del mantenimiento de los activos.

El cumplimiento de la programación de mantenimiento en la gestión de activos es un aspecto crítico para garantizar que los activos de una organización funcionen de manera eficiente y segura a lo largo de su ciclo de vida. Algunas consideraciones importantes para lograr un alto nivel de cumplimiento en la programación de mantenimiento:

1. Planificación adecuada: Es fundamental contar con un plan de mantenimiento sólido que detalle las actividades de mantenimiento requeridas para cada activo, incluyendo la frecuencia, los recursos necesarios y los procedimientos específicos.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

50

2. Programación eficiente: La programación de mantenimiento debe ser eficiente y optimizada para minimizar el tiempo de inactividad de los activos. Esto implica programar las tareas de mantenimiento en momentos que tengan el menor impacto en la producción o el funcionamiento del activo.

3. Recursos adecuados: Asegúrate de contar con los recursos humanos, materiales y herramientas necesarios para llevar a cabo las tareas de mantenimiento de acuerdo con el programa.

4. Seguimiento y supervisión: Es esencial llevar un seguimiento constante de la ejecución del programa de mantenimiento. Utiliza sistemas de gestión de activos o software de mantenimiento para supervisar y controlar el progreso.

5. Capacitación del personal: El personal encargado de realizar las tareas de mantenimiento debe estar debidamente capacitado y familiarizado con los procedimientos para garantizar que se realicen de manera efectiva.

6. Mantenimiento preventivo: El mantenimiento preventivo debe ser una parte importante de la programación. Esto implica la realización de tareas programadas para prevenir problemas antes de que ocurran.

7. Gestión de repuestos y suministros: Asegúrate de tener un inventario adecuado de repuestos y suministros para evitar retrasos en las tareas de mantenimiento debido a la falta de materiales.

8. Registros y documentación: Mantén registros detallados de todas las actividades de mantenimiento, incluyendo las fechas de ejecución, los resultados y cualquier problema encontrado. Esta documentación es fundamental para el seguimiento y la toma de decisiones.

9. Evaluación y mejora continua: Realiza evaluaciones periódicas del programa de mantenimiento para identificar oportunidades de mejora. Ajusta el programa según sea necesario para optimizar su eficiencia y eficacia.

10. Cumplimiento normativo: Asegúrate de que todas las actividades de mantenimiento cumplan con las regulaciones y estándares de seguridad aplicables. El incumplimiento de regulaciones puede tener graves consecuencias legales y de seguridad.

También encontramos el indicador de Trabajos Atrasados Acumulados (TAA) que son una métrica importante en la gestión de activos que se refiere a las tareas de mantenimiento programadas que no se han realizado en el tiempo previsto. Estos trabajos atrasados pueden acumularse con el tiempo y tener un impacto negativo en la eficiencia operativa y la confiabilidad de los activos. Aquí hay algunas consideraciones sobre los Trabajos Atrasados Acumulados en la gestión de activos:

1. Impacto en la confiabilidad y disponibilidad de activos: Cuando las tareas de mantenimiento programadas se retrasan o se acumulan, los activos pueden volverse menos confiables y experimentar más tiempo de inactividad no planificado. Esto puede afectar la disponibilidad de los activos y disminuir su vida útil.

2. Riesgo de averías y costos imprevistos: Los TAA aumentan el riesgo de averías inesperadas, lo que puede resultar en costos significativos debido a reparaciones urgentes, tiempos de inactividad prolongados y la necesidad de reemplazo de activos.

3. Identificación de causas: Es importante identificar las causas de los TAA. Estos retrasos pueden deberse a problemas en la programación, falta de recursos, falta de repuestos, problemas de personal, o cambios en las prioridades. Comprender las razones detrás de los TAA es esencial para abordar el problema de manera efectiva.

4. Priorización y gestión de TAA: No todos los trabajos atrasados tienen la misma importancia. Es fundamental priorizar y gestionar los TAA en función de su impacto en la seguridad, la confiabilidad y el rendimiento de los activos. Esto implica evaluar críticamente cuáles deben realizarse primero y asignar los recursos necesarios.

5. Planificación y programación mejoradas: Para reducir los TAA, es esencial mejorar la planificación y programación de las tareas de mantenimiento. Esto incluye garantizar que los trabajos estén programados en momentos que minimicen el impacto en la producción y que los recursos necesarios estén disponibles.

6. Gestión de recursos y repuestos: Asegurarse de contar con los recursos humanos, materiales y repuestos necesarios para llevar a cabo las tareas programadas de manera oportuna. La gestión eficiente de los recursos es clave para reducir los TAA.

7. Sistema de seguimiento y documentación: Implementar un sistema de seguimiento y documentación efectivo para mantener un registro de todas las tareas de mantenimiento programadas y sus estados. Esto ayuda a identificar rápidamente los trabajos atrasados y tomar medidas para abordarlos.

8. Mejora continua: La gestión de TAA debe ser parte de un proceso de mejora continua en la gestión de activos. Se deben analizar regularmente las causas de los TAA y tomar medidas correctivas para reducir su ocurrencia.

El indicador de porcentaje de Mantenimiento Reactivo es una métrica clave en la gestión de activos que se utiliza para evaluar el equilibrio entre el mantenimiento reactivo y el mantenimiento planificado o preventivo. El mantenimiento reactivo es costoso y generalmente indica una gestión deficiente de activos, ya que implica abordar problemas solo después de que han ocurrido. Para calcular el porcentaje de Mantenimiento Reactivo, de forma general se utiliza la siguiente fórmula:

Ecuación 5 - % de mantenimiento reactivo

$$\% \text{ de mantenimiento Reactivo} = \left(\frac{\text{Tiempo mantenimiento reactivo}}{\text{Tiempo mantenimiento Total}} \right) \times 100$$

Donde:

- Tiempo de Mantenimiento Reactivo se refiere al tiempo que se gasta en tareas de mantenimiento reactivas, es decir, en la reparación de activos después de que han fallado.

- Tiempo de Mantenimiento Total incluye el tiempo dedicado tanto al mantenimiento reactivo como al mantenimiento planificado o preventivo. Esto abarca todas las horas-hombre dedicadas al mantenimiento.

El porcentaje resultante te indicará cuánto del tiempo de mantenimiento se está utilizando de manera reactiva en comparación con el tiempo total de mantenimiento. Un valor alto de este indicador sugiere una alta proporción de mantenimiento reactivo, lo cual es indeseable y puede indicar ineficiencias en la gestión de activos. El objetivo general es reducir este porcentaje y aumentar la cantidad de tiempo dedicada al mantenimiento planificado y preventivo, que es más rentable y ayuda a evitar problemas antes de que ocurran.

Una gestión de activos efectiva busca minimizar el mantenimiento reactivo y maximizar el mantenimiento planificado para mejorar la confiabilidad, la disponibilidad y la eficiencia de los activos. Este indicador es una herramienta importante para evaluar el progreso hacia ese objetivo y tomar decisiones informadas para mejorar la gestión de activos.

En SAR ENERGY se evalúa este indicador en función de OT's.

Etapas 4. Análisis de capacitaciones para el personal O&M relacionados con la gestión de activos.

SAR ENERGY cuenta con un plan de capacitaciones para su personal, el cual se ejecuta de manera anual. Este plan de capacitaciones se aplica a todos los niveles de la organización desde el personal técnico-operativo hasta el personal administrativo y gerencial.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

54

Para este análisis se tienen en cuenta los datos relacionados con la ejecución de capacitaciones de tipo técnico durante el año 2023 para el proyecto Indico. En este proyecto se cuenta con el personal operativo relacionado en la siguiente tabla:

Tabla 8 - Personal operativo campo Indico

PERSONAL CAMPO INDICO	
CARGO	CANTIDAD
TÉCNICO ELECTROMECHANICO	2
TÉCNICO INSTRUMENTISTA	1
ASISTENTE DE OPERACIONES	46
OPERADOR	8
SUPERVISOR DE O&M	2
AUXILIAR EN ENTRENAMIENTO	18
TOTAL	77

Nota: Información suministrada por el área de Gestión Humana.

De las capacitaciones realizadas por SAR ENERGY para el año 2023, de acuerdo al personal asignado a este proyecto se han ejecutado las siguientes capacitaciones:

Tabla 9 - Análisis de capacitaciones

ITEM	CAPACITACIÓN	TÉCNICO ELECTROMECHANICO	TÉCNICO INSTRUMENTISTA	ASISTENTE DE OPERACIONES	OPERADOR	SUPERVISOR DE O&M	AUXILIAR EN ENTRENAMIENTO	TOTAL PERSONAL ASISTENTE
1	CÁLCULOS DE PRODUCCIÓN	0	0	0	0	0	3	3
2	VÁLVULAS: TIPOS, FUNCIÓN Y USO ADECUADO.	0	0	5	1	1	1	8
3	MANTENIMIENTO BÁSICO	1	1	6	3	1	0	12
TOTAL ASISTENTES POR CARGO		1	1	11	4	2	4	23
% CAPACITACIÓN SOBRE TOTAL PERSONAL		50,0%	100,0%	23,9%	50,0%	100,0%	22,2%	29,9%

Se evidencia que han ejecutado 3 capacitaciones de tipo técnico para el personal de operación y mantenimiento del proyecto Indico; así como un porcentaje del 33% que asiste a estas capacitaciones.

Etapa 5. Propuesta de indicadores.

Para una compañía líder en el sector de servicios para la industria de hidrocarburos en Colombia, es crucial contar con indicadores de mantenimiento y operación que permitan medir la eficiencia, confiabilidad y seguridad de sus operaciones. A continuación, se proporciona una propuesta de indicadores que podrían aportar a la mejora continua de SAR ENERGY:

Indicadores de Mantenimiento:

Disponibilidad de Equipos Críticos: La disponibilidad de equipos críticos en la industria petrolera es fundamental por varias razones clave:

- **Operaciones Ininterrumpidas:** Los equipos críticos, como plataformas de perforación, bombas y sistemas de transporte, son vitales para mantener las operaciones petroleras funcionando sin interrupciones. La medición de su disponibilidad ayuda a garantizar que estos equipos estén listos para operar cuando se necesiten, evitando tiempos de inactividad costosos y peligrosos.
- **Seguridad:** En la industria petrolera, la seguridad es primordial. Los equipos críticos deben estar en condiciones óptimas para reducir el riesgo de accidentes

o fallas que puedan poner en peligro la seguridad de los trabajadores y el medio ambiente.

- **Eficiencia y Rentabilidad:** La falta de disponibilidad de equipos críticos puede resultar en retrasos en la producción, lo que a su vez puede generar costos adicionales. Medir la disponibilidad ayuda a identificar áreas donde se pueden mejorar los tiempos de inactividad y aumentar la eficiencia operativa, lo que contribuye a la rentabilidad general de las operaciones.
- **Mantenimiento Predictivo:** La medición de la disponibilidad permite implementar estrategias de mantenimiento predictivo. Al monitorear constantemente la disponibilidad de estos equipos, se pueden identificar patrones de fallas o degradación, lo que permite realizar mantenimiento preventivo en lugar de reaccionar a problemas costosos después de que ocurran.
- **Cumplimiento Normativo:** Hay regulaciones estrictas sobre la operación segura y confiable de equipos en la industria petrolera. Medir y mantener la disponibilidad de equipos críticos ayuda a cumplir con estas normativas.

Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de Equipos de Críticos: Medir el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de equipos críticos en la industria petrolera es esencial por varias razones:

- **Predictibilidad de Fallas:** El MTBF proporciona una estimación de la confiabilidad de un equipo al calcular el tiempo promedio entre fallas. Esta medida ayuda a prever cuándo es probable que ocurran fallas, lo que permite programar el mantenimiento preventivo y minimizar tiempos de inactividad no planificados.
- **Planificación de Mantenimiento:** Conociendo el MTBF, las empresas pueden establecer programas de mantenimiento más efectivos. En lugar de esperar a que ocurran fallas, el MTBF permite programar inspecciones y mantenimiento de manera proactiva, lo que puede reducir los costos asociados con reparaciones inesperadas y prolongar la vida útil de los equipos.
- **Optimización de Recursos:** La medición del MTBF ayuda a asignar recursos de manera más eficiente. Al comprender cuándo es más probable que ocurran las fallas, las empresas pueden programar los recursos humanos, financieros y materiales de manera más efectiva para minimizar el impacto de los tiempos de inactividad.
- **Mejora Continua:** El seguimiento del MTBF a lo largo del tiempo permite evaluar la efectividad de las estrategias de mantenimiento implementadas. Si el MTBF mejora, significa que las medidas de mantenimiento preventivo están funcionando. En contraste, si el MTBF disminuye, puede ser indicativo de que se necesitan ajustes en las estrategias de mantenimiento.

- **Seguridad y Cumplimiento Normativo:** La monitorización del MTBF puede contribuir a garantizar la seguridad de los trabajadores y el cumplimiento de regulaciones. Equipos más confiables y con menor probabilidad de fallas reducen los riesgos laborales y pueden ayudar a cumplir con estándares de seguridad y ambientales exigidos por la industria y los reguladores.

Tiempo Medio para Reparar (MTTR) de Equipos Críticos: Medir el Tiempo Medio para Reparar (MTTR) de equipos críticos en la industria petrolera es crucial por diversas razones:

- **Reducción de Tiempos de Inactividad:** El MTTR representa el tiempo promedio que se necesita para reparar un equipo después de una falla. Cuanto menor sea el MTTR, menor será el tiempo que el equipo crítico esté inoperable. La reducción de tiempos de inactividad es fundamental para mantener la continuidad operativa y minimizar pérdidas económicas.
- **Eficiencia Operativa:** Medir el MTTR ayuda a identificar procesos de reparación ineficientes. Permite evaluar la eficiencia de las estrategias de mantenimiento y reparación existentes y buscar oportunidades para optimizar los procedimientos, herramientas o recursos utilizados en el proceso de reparación.
- **Planificación de Recursos:** Conocer el MTTR permite una mejor planificación de recursos humanos y materiales. Las empresas pueden asignar el personal adecuado y los recursos necesarios para reparar los equipos de manera más

rápida y eficiente, minimizando así los impactos negativos en la producción y las operaciones.

- **Mantenimiento Predictivo:** La comprensión del MTTR puede contribuir al desarrollo de estrategias de mantenimiento predictivo. Al comprender cuánto tiempo lleva reparar un equipo, las empresas pueden programar el mantenimiento preventivo de manera más efectiva para evitar fallas y reducir la necesidad de reparaciones extensas.
- **Cumplimiento de Metas:** Establecer metas de MTTR realistas y medir su cumplimiento ayuda a evaluar el rendimiento y la eficacia de los equipos de mantenimiento. Esto puede ser útil para definir estándares de desempeño, identificar áreas de mejora y fomentar la excelencia operativa.

Cumplimiento de Programas de Mantenimiento Preventivo: Medir el cumplimiento de programas de mantenimiento preventivo en la industria petrolera es esencial por varias razones:

- **Confiabilidad Operativa:** El mantenimiento preventivo está diseñado para prevenir fallas y mantener los equipos en condiciones óptimas. Medir el cumplimiento de estos programas asegura que se lleven a cabo las inspecciones, ajustes y reparaciones planificadas, lo que mejora la confiabilidad operativa y reduce el riesgo de fallas catastróficas o tiempos de inactividad no planificados.

- **Prolongación de la Vida Útil de Equipos:** El mantenimiento preventivo ayuda a prolongar la vida útil de los equipos críticos. Al medir su cumplimiento, se garantiza que se implementen las acciones necesarias para prevenir la degradación prematura y el desgaste excesivo, lo que a su vez reduce los costos asociados con la sustitución frecuente de equipos.
- **Seguridad y Conformidad Regulatoria:** El cumplimiento de programas de mantenimiento preventivo contribuye a la seguridad en el lugar de trabajo y ayuda a cumplir con los estándares regulatorios. Equipos bien mantenidos tienen menos probabilidades de fallar, lo que reduce los riesgos para los trabajadores y minimiza posibles impactos ambientales, alineándose así con normativas y regulaciones establecidas.
- **Eficiencia en Costos:** Aunque el mantenimiento preventivo requiere inversión de recursos, a largo plazo, suele ser más rentable que el mantenimiento reactivo. Al medir el cumplimiento de estos programas, se asegura que los recursos se utilicen de manera eficiente, evitando gastos innecesarios asociados con reparaciones urgentes o reemplazos costosos.
- **Mejora Continua:** La medición del cumplimiento del mantenimiento preventivo permite evaluar la efectividad de los programas existentes. Los datos recopilados pueden utilizarse para identificar áreas de mejora, ajustar las estrategias de mantenimiento y optimizar la planificación de actividades preventivas futuras.

Costo de Mantenimiento por Barril Producido: Medir el costo de mantenimiento por barril producido en la industria petrolera es una métrica clave por diversas razones:

- **Eficiencia Operativa:** Esta métrica permite evaluar la eficiencia de los procesos de mantenimiento en relación con la producción. Un bajo costo de mantenimiento por barril producido indica que se están gestionando eficazmente los recursos para mantener la producción, lo que contribuye a una operación más rentable.
- **Control de Costos:** Permite identificar los costos asociados directamente con el mantenimiento de equipos críticos. Al tener una idea precisa de estos costos, la empresa puede controlar mejor su presupuesto, identificar áreas de gastos excesivos y buscar formas de optimizar los recursos para reducir el costo por barril producido.
- **Optimización de Estrategias de Mantenimiento:** Al medir el costo de mantenimiento por barril, se pueden evaluar las estrategias de mantenimiento utilizadas. Esto permite identificar si las estrategias son eficientes en términos de costos en relación con la producción y si es necesario ajustarlas para optimizar la relación coste-rendimiento.
- **Benchmarking y Comparaciones:** Esta métrica permite comparar el desempeño entre diferentes operaciones, áreas geográficas o periodos de tiempo. Facilita el benchmarking con la industria y ayuda a establecer metas

realistas, identificar las mejores prácticas y mejorar continuamente el desempeño.

- **Toma de Decisiones Estratégicas:** Conocer el costo de mantenimiento por barril producido ayuda a la toma de decisiones estratégicas. Si este costo es alto, puede indicar la necesidad de inversiones en equipos más confiables, actualizaciones tecnológicas o cambios en las estrategias de mantenimiento para optimizar la rentabilidad.

Eficiencia del Personal de Mantenimiento: La eficiencia del personal de mantenimiento en la industria petrolera es fundamental para garantizar un funcionamiento óptimo de los equipos críticos. Medir esta eficiencia es crucial por varias razones:

- **Productividad:** La eficiencia del personal de mantenimiento está estrechamente relacionada con la productividad general de la planta. Un personal eficiente puede realizar tareas de mantenimiento de manera más rápida y efectiva, minimizando así los tiempos de inactividad y maximizando la producción.
- **Costos Operativos:** Un personal de mantenimiento eficiente puede ayudar a controlar los costos operativos. Si el personal es capaz de completar las tareas de mantenimiento de manera eficiente, se pueden reducir los costos asociados con el tiempo extra, el uso ineficiente de recursos y los retrasos en la producción.

- **Calidad del Mantenimiento:** La eficiencia del personal de mantenimiento también está ligada a la calidad del trabajo realizado. Un equipo eficiente tiende a realizar tareas de mantenimiento con mayor precisión y atención al detalle, lo que contribuye a la fiabilidad y seguridad de los equipos.
- **Utilización de Recursos:** Medir la eficiencia del personal de mantenimiento ayuda a evaluar cómo se están utilizando los recursos disponibles, como el tiempo, el personal y los equipos. Esto permite identificar oportunidades para optimizar la distribución de recursos y mejorar la eficiencia global de las operaciones.
- **Mejora Continua:** Al monitorear la eficiencia del personal de mantenimiento, se pueden identificar áreas de mejora y establecer metas realistas. Esto fomenta la mejora continua mediante la implementación de capacitación adicional, revisión de procesos o la adopción de tecnologías más eficientes.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

Tabla 10 - Cuadro de mando

O&M		2023				
OBJETIVO SAR ENERGY	INDICADOR PROPUESTO	Valor Actual	Rangos de Alerta			Acumulado anual
Prestar servicios de mantenimiento ajustados a las necesidades de nuestros clientes.	Disponibilidad de equipos críticos	0%	98%	98%<I<90%	90%	
	Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de Equipos Críticos	0%	93h	93h<I<85h	85h	
	Tiempo Medio para Reparar (MTTR) de Equipos Críticos	0%	93h	93h<I<85h	85h	
	Costo de Mantenimiento por Barril Producido	0%	\$	\$	\$	-
OBJETIVO	INDICADOR	Valor Actual	Rangos de Alerta			Acumulado anual
Recurso humano altamente calificado.	Cumplimiento de Programas de Mantenimiento Preventivo	0%	100%	100%<I<95%	95%	-
	Eficiencia del Personal de Mantenimiento	0%	90%	90%<I<80%	80%	

Nota: Los rangos de alerta deben ser establecidos por SAR ENERGY de acuerdo al proyecto.

La evaluación anual de indicadores acumulados proporciona una perspectiva histórica valiosa que informa la toma de decisiones estratégicas, mejora la eficiencia operativa y permite un enfoque más proactivo para la mejora continua.

Conclusiones

- Actualmente SAR ENERGY no cuenta con una herramienta que proporcione un análisis de criticidad para los activos; teniendo en cuenta la afectación al medio ambiente, la seguridad de las personas y los equipos y la parte financiera; se recomienda realizar un análisis de criticidad de los activos a utilizar en cada proyecto previo al inicio del mismo, buscando establecer la mejor estrategia de operación y mantenimiento que agregue valor a los activos de SAR y afecte positivamente el activo intangible como es la marca SAR ENERGY.
- Dentro del análisis de las capacitaciones ejecutadas por SAR ENERGY durante el año 2023 se considera un porcentaje bajo tanto en capacitaciones como en asistencia por parte del personal lo que puede en algún momento puede generar incidentes de tipo ambiental u operativo, mantenimientos correctivos, pérdida de producción entre otros. Esta condición puede afectar la generación de valor del activo humano en los activos de SAR ENERGY. Se recomienda buscar alianzas con proveedores de repuestos y/o ventas de los equipos considerados más críticos para dar charlas específicas sobre mantenimiento y operación de estos; así mismo establecer en el largo plazo estrategias de operación basada en ventanas operativas de integración tomando como referencia la norma API 584.
- De acuerdo a los indicadores actuales establecidos por SAR ENERGY para las etapas de operación y mantenimiento (O&M) y analizados en esta monografía;

es importante, hacer un seguimiento continuo de los indicadores previamente mencionados por varias razones claves:

- El seguimiento continuo permite identificar tendencias a lo largo del tiempo. Esto proporciona una visión histórica que ayuda a comprender cómo están cambiando los indicadores, si están mejorando o empeorando, y qué factores pueden estar contribuyendo a esos cambios. Se pueden detectar problemas o desviaciones de los estándares establecidos de manera temprana. Esto permite tomar medidas correctivas antes de que los problemas se conviertan en situaciones críticas o costosas.
- El seguimiento continuo proporciona datos en tiempo real que pueden utilizarse para ajustar y optimizar estrategias y procesos. Permite realizar cambios proactivos para mejorar la eficiencia y la efectividad de las operaciones. Evaluar la efectividad de las estrategias implementadas. Si los indicadores no muestran mejoras o no cumplen con los objetivos deseados, el seguimiento continuo proporciona la oportunidad de reevaluar las estrategias y realizar ajustes.
- Los datos recopilados a través del seguimiento continuo brindan una base sólida para la toma de decisiones. La información actualizada y precisa permite tomar decisiones informadas y estratégicas que afectan la gestión operativa y financiera. Ayuda a garantizar que SAR ENERGY se mantenga en el camino correcto para cumplir con sus objetivos a largo plazo. Permite verificar si se están alcanzando las metas establecidas y tomar medidas correctivas si es necesario.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY

67

- Definir indicadores y metas para cada proyecto en SAR Energy es esencial para su éxito operativo y estratégico. Facilita la toma de decisiones basada en datos, impulsa la mejora continua y garantiza un enfoque enfocado en los objetivos específicos de cada iniciativa.

Referencias bibliográficas

- Campbell, J. D., Reyes-Picknell, J. V., & Kim, H. (2015). *Uptime - Strategies for Excellence in Maintenance Management* (Tercera Edición ed.). New York, New York, Estados Unidos: Productivity Press. doi:<https://doi.org/10.1201/b18778>
- DANE. (23 de 04 de 2023). *DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA*. Obtenido de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/exportaciones>.
- Garcia Palencia, O. (2012). *Gestion moderna del mantenimiento industrial*. Bogota: Ediciones de la U.
- HIGGINS, L. R. (2008). *MAINTENANCE ENGINEERING HANDBOOK*. New York: MC GRAW HILL.
- JHON D. CAMPBELL, J. V. (2016). *UPTIME STRATEGIES FOR EXCELLENCE IN MAINTENANCE MANAGEMENT*. Boca Raton: CRC PRESS.
- Mathew, J., Ma, L., Tan, A., Lee, J., & Weijnen, M. (2011). *ENGINEERING ASSET MANAGEMENT AND INFRASTRUCTURE SUSTAINABILITY*. Londres, Inglaterra: Springer Verlag London Limited. doi:DOI 10.107/9780857295
- MOUBRAY, J. (1997). *RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE*. New York: Industrial Press Inc.
- NORMALIZACIÓN, A. E. (11 de 07 de 2018). *UNE*. Obtenido de . <https://www.une.org/>
- Ortiz Buitrago, V. P. (2021). Importancia y ventajas de los KPI (Key Performance Indicators) en los proyectos: enfoque de procesos en el sector petrolero. *Importancia y ventajas de los KPI (Key Performance Indicators) en los proyectos: enfoque de procesos en el sector petrolero*. Bucaramanga, Colombia.

**DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE LAS ETAPAS DE OPERACIÓN
Y MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS DE SAR ENERGY**

69

PALMER, R. D. (2013). *MAINTENANCE PLANNING AND SCHEDULING HANDBOOK*. NEW YORK: MC GRAW HILL.

R.KEITH MOBLEY. (2014). *MAINTENANCE ENGINEERING HANDBOOK*. NEW YORK: MC GRAW HILL.

SAR ENERGY. (27 de 04 de 2023). BROCHURE. *Brochure de servici*. Bogotá, Colombia.