

**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO A EQUIPOS DE SUPERFICIE EN UNA  
FACILIDAD DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO.**

**FERNANDO BALLÉN CÁRDENAS**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA -UNAD  
ESCUELA DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS, CONTABLES, ECONÓMICAS Y DE  
NEGOCIOS –ECACEN  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE PROYECTOS**

**BOGOTÁ, D.C.,**

**2017**

**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO A EQUIPOS DE SUPERFICIE EN UNA  
FACILIDAD DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO.**

**FERNANDO BALLÉN CÁRDENAS**

**Monografía de Grado presentada como requisito para optar al título de  
Especialista en Gestión de Proyectos.**

**Directora: Gloria Liliana González González  
Administradora de Empresas**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA UNAD  
ESCUELA DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS, CONTABLES, ECONÓMICAS  
Y DE NEGOCIOS –ECACEN  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE PROYECTOS  
BOGOTÁ, D.C.,  
2017**

## **DEDICATORIA**

A mí esposa Yolanda por estar siempre con sus oraciones  
A mis hijos –Carlos Fernando y Juan Sebastián por la motivación.  
A Santa Marta por hacer la carga ligera.

### **AGRADECIMIENTOS**

A los compañeros de trabajo en campo.

A los técnicos de mantenimiento mecánico.

A los jefes de área de las facilidades.

A la Dra. Gloria Liliana González González mi directora de monografía.

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO A EQUIPOS DE SUPERFICIE EN UNA FACILIDAD DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO.

**AUTOR:** FERNANDO BALLÉN CÁRDENAS

**PALABRAS CLAVES:** DISMINUCIÓN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO, EQUIPOS CRITICOS, MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN, MANTENIMIENTO PREDICTIVO, TÉCNICAS PREDICTIVAS.

### DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo de monografía se analiza parte de la implementación de un modelo de mantenimiento predictivo a equipos de superficie en una facilidad de producción de petróleo, además se hace referencia a algunos requerimientos que deben considerarse mínimamente para poder demostrar que se tiene implementado este tipo de mantenimiento y su aplicación en equipos críticos, con lo que se logra incrementar su disponibilidad y confiabilidad.

La implementación de este mantenimiento tiene el propósito de evitar que los equipos que intervienen en la producción dejen de funcionar inesperadamente y la afectan negativamente, no obstante que regularmente se tiene un plan de mantenimiento preventivo establecido, con el cual se espera evitar que las fallas en los equipos se presenten sin ser detectados a tiempo.

Cuando se elabora un plan de mantenimiento, normalmente éste se basa en dos criterios; el primero relacionado con las instrucciones que proporcionan los fabricantes y el segundo criterio se relaciona con planearlo teniendo en cuenta el tiempo de uso y desgaste normal del equipo, esto significa que entre más edad tenga el equipo mayor será la probabilidad de falla.

Es frecuente que las fallas se presenten en momentos en los cuales no se encuentra la totalidad del personal técnico para atenderlas, lo que hace más crítica y traumática la situación y es por ello que se busca mejorar las técnicas de detección de la falla y de esta manera realizar una planeación exitosa y efectiva que lleve a la compañía a obtener resultados positivos económicamente.

La facilidad objeto de análisis cuenta con equipos que en condiciones ideales de operación deben cumplir con 90% de disponibilidad para ser usadas y se detecta que este porcentaje está por debajo del requerido, lo que motiva que se realice una evaluación para determinar la causa de esa baja

disponibilidad, conllevando posteriormente a que se implemente el mantenimiento predictivo a los equipos de superficie, como parte de las recomendaciones dadas.

## SUMMARY

**TITLE:** ANALYSIS OF THE IMPLEMENTATION OF A PREDICTIVE MAINTENANCE MODEL TO SURFACE EQUIPMENT IN A FACILITY OF PETROLEUM PRODUCTION.

**AUTHOR:** FERNANDO BALLÉN CÁRDENAS

**KEYWORDS:** PREDICTIVE MAINTENANCE, CRITICAL EQUIPMENT, PREDICTIVE TECHNIQUES, DECREASE OF MAINTENANCE COSTS, MAINTENANCE BASED ON CONDITION.

**DESCRIPTION:**

In the present work of monograph analyzes part of the implementation of a predictive maintenance model to surface equipment in an oil production facility, in addition is referred to some requirements that must be considered minimally to be able to demonstrate that this type has been implemented Of maintenance and its application in critical equipment, with which it is possible to increase its availability and reliability.

The implementation of this maintenance is intended to prevent equipment involved in production from unexpectedly ceasing to function and adversely affecting it, although a well-established preventative maintenance plan is regularly in place, which is expected to prevent failures in The equipment will be shown to be detected in time.

When a maintenance plan is drawn up, it is normally based on two criteria; The first related to the instructions provided by the manufacturers and the second criterion relates to planning it taking into account the normal wear and tear of the equipment, this means that the older the equipment, the greater the probability of failure.

Failures often occur at times when the entire technical staff is not available to attend to them, which makes the situation more critical and traumatic, which is why it is sought to improve fault detection techniques and this to carry out a successful and effective planning that leads the company to obtain positive results economically.

The facility under analysis has equipment that under ideal conditions of operation must comply with 90% availability to be used and it is detected that this percentage is below the required, which motivates an evaluation to determine the cause of that Low availability, leading subsequently to the implementation of predictive maintenance to surface equipment, as part of the recommendations given.

**Contenido.**

<b>RESUMEN.....</b>	<b>5</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>7</b>
<b>Introducción. ....</b>	<b>12</b>
<b>Planteamiento del problema. ....</b>	<b>14</b>
<b>Justificación. ....</b>	<b>16</b>
<b>1. Objetivos. ....</b>	<b>18</b>
<b>1.1. Objetivo General. ....</b>	<b>18</b>
<b>1.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>18</b>
<b>2. Marco referencial del sector del mantenimiento.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Marco Teórico. ....</b>	<b>18</b>
<b>2.2. Surgimiento del mantenimiento centrado en confiabilidad, -RCM. ....</b>	<b>19</b>
<b>2.3. Generalidades del proceso de producción del petróleo.....</b>	<b>35</b>
<b>2.4. Etapas previas a la producción de pozos de petróleo.....</b>	<b>36</b>
<b>2.5. Métodos de producción del petróleo.....</b>	<b>38</b>
<b>2.6. Flujo natural. ....</b>	<b>38</b>
<b>2.7. Métodos Artificiales. ....</b>	<b>39</b>
<b>2.7.1. Bombeo Mecánico. ....</b>	<b>39</b>
<b>2.7.2. Gas Lift.....</b>	<b>42</b>
<b>2.7.3. Bombeo hidráulico. ....</b>	<b>43</b>
<b>2.7.4. Bombas electrosumergibles. ....</b>	<b>44</b>

2.7.5. Facilidades de superficie.....	44
2.8. Accesorios y equipos.....	46
2.8.1. Manifold de producción.....	46
2.8.2. Válvulas.....	48
2.8.3. Válvulas de compuerta.....	48
2.8.4. Válvulas de bola, tapón y mariposa.....	50
2.8.5. Válvulas de control-manual.....	51
2.8.6. Separadores.....	52
2.8.7. Tratadores térmicos.....	53
2.8.8. Intercambiadores de calor.....	54
2.8.9. Medidores de flujo.....	54
2.8.10. Bombas.....	55
2.8.11. Bombas centrífugas.....	55
2.8.12. Bombas de desplazamiento positivo.....	57
2.8.13. Compresores.....	59
2.9. Generadores.....	60
2.10. Motores.....	61
2.10.1. Motor de combustión interna.....	61
2.10.2. Motores eléctricos.....	63
2.11. Unidades automáticas de fiscalización y transferencia –LACT.....	64

<b>3. Implementación de mantenimiento predictivo en equipos de superficie.....</b>	<b>67</b>
<b>3.1. Revisión de los equipos. ....</b>	<b>69</b>
<b>3.2. Revisión de criticidad y confiabilidad. ....</b>	<b>69</b>
<b>3.3. Selección de la técnica de medición: .....</b>	<b>73</b>
<b>3.4. Recolección y análisis de la información:.....</b>	<b>74</b>
<b>3.5. Determinar que tareas de mantenimiento se van a implementar y hacer la retroalimentación respectiva.....</b>	<b>75</b>
<b>4. Condiciones básicas para asegurar la implementación del mantenimiento predictivo a equipos de superficie en facilidades de producción de petróleo. ....</b>	<b>76</b>
<b>5. Conclusiones. ....</b>	<b>79</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>79</b>

**Lista de figuras.**

Figura 1. Gestión del Mantenimiento..... 23

Figura 2. Muestras de Crudo. Fuente Ecopetrol..... 36

Figura 3. Equipo de perforación. Fuente Ecopetrol. .... 37

Figura 4. Unidad de Bombeo Mecánico. Fuente: Hocol..... 40

Figura 5. Bomba de subsuelo. Fuente Ecopetrol..... 41

Figura 6. Varillas de conexión. Fuente Ecopetrol..... 42

Figura 7. Gas lift. Fuente: Ecopetrol ..... 43

Figura 8. Vista de una facilidad de producción. Fuente: Hocol..... 45

Figura 9. Múltiple de recibo. Fuente: Hocol ..... 46

Figura 10. Árbol de navidad cabezal de pozo. Fuente: Hocol. .... 47

Figura 11. P&ID. Cabezal de pozo a manifold de producción. Fuente: Hocol..... 48

Figura 12. Válvula de compuerta. Fuente: Hocol ..... 49

Figura 13. Válvula de bola. Fuente: Hocol ..... 50

Figura 14. Tipos de válvulas. Fuente: Hocol SA. .... 51

Figura 15. Separadores. Fuente: Hocol SA. .... 52

Figura 16. Esquema de un separador bifásico horizontal. Fuente: Hocol SA..... 53

Figura 17. Alineación ejes motor/bomba. Fuente Hocol. .... 57

Figura 18. Unidad LACT. Fuente: Cameron..... 66

Figura 19. Flujograma del mantenimiento predictivo. Fuente ISO..... 71

## **Introducción.**

En el procesamiento del petróleo se realiza la extracción y producción de crudo, para ello se construye un lugar específico adaptado a las necesidades el cual se denomina “facilidad de producción”, en ella se encuentran los equipos requeridos, los cuales deben presentar una disponibilidad mecánica del 95% para asegurar el margen máximo del negocio.

Durante un primer semestre del año se obtienen valores entre 80% y 85%, los cuales están por debajo del indicador fijado a causa de fallas recurrentes en los equipos principales y sistemas auxiliares eléctricos, afectando directamente las utilidades e imagen de la empresa.

Inicialmente se realizaron varios análisis de causa raíz para eventos puntuales y análisis de mejora en el sistema eléctrico. Las causas planteadas demostraron que los problemas señalados se pudieron prever con el uso de pruebas sencillas para detectar fallas incipientes en los equipos utilizados en la producción de crudo. Por ejemplo: daño progresivo y desgaste acelerado en pistones de compresores de gas reciprocantes, causados por el mismo fluido del proceso, cuyas recomendaciones apuntaron a monitorear el equipo debido a que su criticidad requería evitar mantenimientos correctivos y paradas no deseadas. Otro ejemplo fueron las innumerables fallas en la red eléctrica propia, causadas por eventos normales en sus equipos, fácilmente detectables a través de inspecciones sensoriales y mediante inspecciones termográficas - estas fallas eran un factor determinante en las pérdidas de producción debido a que muchos pozos de petróleo están electrificados y dependen directamente de éste sistema eléctrico.

En este sentido, los análisis arrojan la necesidad de implementar un modelo de gestión de mantenimiento predictivo, que para la fecha consiste exclusivamente en la aplicación de análisis de vibraciones a ciertos equipos como bombas y motores de combustión interna y termografía a otros, pero sin la consideración de lineamientos o estándares que generen una mejora al desempeño general

del proceso; en ese momento las decisiones en torno a esta tecnología obedecen a la intuición más que a un plan estructurado de mantenimiento a partir de un análisis previo.

Por todo lo anterior, la empresa realiza un diagnóstico del estado específico del mantenimiento y a partir de éste, plantea una solución de ingeniería que da sostenibilidad al desempeño de los equipos para cumplir con los objetivos del negocio. Esta evaluación se realiza a través de la matriz de excelencia, la cual arroja, entre otras recomendaciones, la necesidad de implementar estructuradamente el mantenimiento basado en condición: el cual incluye por una parte el cuidado básico de equipos e inspecciones como parte de la estrategia de mantenimiento y por otra la implementación de técnicas de mantenimiento predictivo, entre las cuales están termografía, análisis de vibraciones, análisis de aceites y ultrasonido.

El autor de este documento monográfico se apoya metodológicamente en sus experiencias y prácticas concretas del ejercicio profesional, las cuales le encaminan hacia la búsqueda, análisis crítico, y evaluación de referentes y fuentes primarias teóricas y técnicas sobre los temas relacionados con la problemática planteada. Todo ello le permite realizar una investigación de tipo formativo para consolidar los conocimientos obtenidos y apropiados en la Especialización de Gestión de Proyectos.

### **Planteamiento del problema.**

En la industria petroquímica se perfora, extrae, produce, trata, mide y refina el petróleo, la etapa de producción está dada por un proceso de levantamiento del crudo, luego pasa a través de equipos de superficie que realizan cada uno un proceso determinado para luego enviarlo al oleoducto central y ser transportado hacia la refinería.

Con el fin de lograr un adecuado funcionamiento de los equipos dentro de la etapa de producción, se realizan varios tipos de mantenimientos planeados para garantizar un 90% de disponibilidad mecánica; este porcentaje asegura el cumplimiento de los objetivos del negocio, de hacerlo rentable disminuyendo las diferidas - barriles no producidos - por causa de mal funcionamiento de algún equipo importante y vital en esta etapa.

Los costos de la no disponibilidad mecánica son generalmente más altos desde el punto de vista de operaciones que de mantenimiento. La pérdida de producción, el período de arranque y estabilización de los procesos, la destrucción o la degradación de equipos y componentes, son algunos de los factores que se derivan de un evento de falla. En muchos casos y situaciones es viable establecer cuál es el costo de la falla, a efectos de anticipar una base comparativa entre el costo de la falla y el costo asociado a instalar, operar y mantener el sistema, ya sea con redundancia - back up - activa o pasiva, o sencillamente estableciendo políticas de operación y mantenimiento, tendientes a garantizar la productividad en la facilidad.

Lo anterior, indica que las metas volumétricas de una compañía petrolera, deben ser construidas con base en los índices de disponibilidad y confiabilidad de los equipos inherentes a los sistemas productivos y a las facilidades de superficie, orientando los esfuerzos a incrementar y garantizar estos índices en aquellos sistemas considerados como críticos. El tiempo de parada, ya sea por mantenimiento preventivo o correctivo, interrumpe el proceso productivo, originando con esto una pérdida de producción, siendo esta la base para la evaluación del costo de no disponibilidad. Lo que

conlleva a que se realice una fase en la cual se establecen los costos derivados de las paradas de cada sistema, a efectos de diseñar los esquemas de redundancia que permitan minimizar los gastos y pérdidas de esa no disponibilidad, mediante el desarrollo de proyectos de mejoramiento de la confiabilidad.

Frecuentemente las facilidades de superficie de algunos pozos de producción de petróleo de alta capacidad volumétrica, dependen de servicios auxiliares - por ejemplo energía eléctrica, suministro de combustible -, que pueden fallar continuamente en el tiempo. En el caso de la pérdida de energía eléctrica, los sistemas tendrán que ser nuevamente puestos en operación. Si existe una demora pronunciada en restablecer el servicio y de hecho restablecer la operación de las facilidades, es posible que se requiera de tiempo adicional para alcanzar los niveles de productividad normales en función del sistema de levantamiento de petróleo. Por ejemplo, en el caso de una bomba electrosumergible que produzca 100 barriles por hora y que requiera de un tiempo de 30 minutos para estabilización de los niveles de producción desde un nivel de 50 barriles por hora, un tiempo de parada de 4 horas implicaría:  $4 \text{ h} * 100 \text{ bph} + 0.5 \text{ h} * 50 \text{ bph} - \text{estabilización} = 425$  barriles, se dejan de producir 425 barriles. El interrogante a resolver en esta fase es precisamente cuál es el costo de no producir 425 barriles de petróleo.

No obstante que estos planes de mantenimiento se cumplen a cabalidad, las facilidades de producción de petróleo presentan fallas en sus equipos no mitigadas, ni detectadas a tiempo, lo que genera paros de producción no deseados, debido a fallas en los equipos con el subsecuente efecto económico en los costos de producción y diferidas, entendidas éstas como el no cumplimiento de la meta de barriles de petróleo programados.

La situación descrita, motiva a implementar técnicas de mantenimiento predictivas que indiquen cuando los activos se encuentran en buen estado a pesar de haber sobrepasado las horas de funcionamiento recomendadas hasta una intervención de mantenimiento programado, sin que éste falle;

de igual forma nos alerta cuando una máquina viene desarrollando una falla potencial que requiere de una intervención próxima para su reparación sin esperar a que falle y pare el proceso de producción.

Al momento de intervenir un equipo diagnosticado con falla potencial, se entra a determinar si éste tiene backup, que responda en la función principal del equipo a mantener y esta parada de equipo no afecte la producción y por ende no impacte la unidad de negocio.

El mantenimiento predictivo da otra dimensión a la gestión de activos, ya que se basa en mediciones periódicas de variables de estado técnico - amplitudes de vibración y sus frecuencias, impulsos de choque, temperatura, presión, espesores, además de otros -, observando la tendencia del cambio de niveles medidos en su comparación con ciertos patrones de referencia en el tiempo ejemplo: normas de severidad de vibración. De esta manera, se organizan sistemas de auscultación de activos en operación para determinar sus necesidades reales de intervención correctiva, preventiva o de mejora, todo ello sin interferir con la disponibilidad productiva de la instalación.

Con base a lo anterior, surge un problema que será el objeto de análisis en la presente monografía el cual es la utilidad del modelo de mantenimiento predictivo aplicado en equipos de superficie en facilidades de producción de petróleo como estrategia para aumentar la disponibilidad y confiabilidad de los mismos.

### **Justificación.**

La industria colombiana tiene diversos renglones dedicados a diferentes tipos de producción como son los alimentos, textiles, medicamentos, químicos y uno de gran importancia como lo es el sector de producción a partir del petróleo. Este tipo de industria se ha caracterizado por tener plantas adaptadas con la mejor y más actualizada tecnología, ya que los indicadores en cuanto a seguridad del proceso se refieren deben cumplir con los estándares mundiales que para el caso aplican. Encontrar fallas en el curso del proceso que allí se aplica es frecuente y también es frecuente dedicarse a detectarlas, debido al compromiso que de éste renglón de producción deriva para la economía del país. Son diversos los

momentos en que se generan al interior de las facilidades proyectos encaminados a mejorar y optimizar el proceso en general, y de acuerdo a esto se implantan nuevas formas de realizar las tareas diarias para lograr la mitigación de situaciones que pueden inducir momentos de no producción a causa de fallos inesperados.

En el ejercicio profesional de los ingenieros mecánicos e industriales, en su recorrido por las empresas del sector productivo - industrial, la planta de producción se torna en un ambiente de reflexión del estado actual de la industria Colombiana, estos profesionales encuentran que existe una necesidad prioritaria en cuanto al mejor desarrollo y aprovechamiento del potencial de las técnicas, metodologías y prácticas que pueden aplicarse, una de ellas es el mantenimiento predictivo<sup>1</sup>.

De otra parte, la política educativa integral implantada a la fecha en los espacios de formación académica, se trasluce en los planes de estudio que reciben los nuevos profesionales, esperando que se actúe profesionalmente con un enfoque innovador al momento de tener la oportunidad de incursionar en el ámbito laboral – industrial, sin embargo en momentos particulares los requerimientos empresariales en las zonas industriales, no son del todo cubiertos, debido a que se adolece de observar en detenimiento la existencia de una fuerte problemática, como lo es la gestión del mantenimiento, que incide directamente en baja productividad, estancamiento de la economía del país y disminución de la calidad de vida<sup>2</sup>.

A raíz de esta problemática, se encuentra que se está desaprovechando en parte el potencial productivo, impidiendo el desarrollo y crecimiento de las regiones, de la industria y de la unidad familiar; sometiéndolos a unas condiciones poco productivas y desalentadoras.

El propósito de este documento al analizar la implementación de un modelo de mantenimiento predictivo es con miras a encontrar algunas aproximaciones valiosas y aplicables respecto al tema.

---

<sup>1</sup> Caracterización ocupacional del mantenimiento. SENA. 2005

<sup>2</sup> Comisión nacional de mantenimiento. ACIEM.

## 1. Objetivos.

### 1.1. Objetivo General.

Analizar la implementación de un modelo de mantenimiento predictivo a equipos de superficie en una facilidad de producción de petróleo.

### 1.2. Objetivos Específicos.

- Revisar la evaluación diagnóstica de los equipos y el modo de falla que presentan.
- Establecer los lineamientos para definir cuáles son los equipos a los que se les debe aplicar el mantenimiento predictivo, las rutinas y frecuencias predictivas.
- Implementar el modelo de mantenimiento predictivo que permita la realización de las diferentes etapas de ejecución con calidad y oportunidad.

## 2. Marco referencial del sector del mantenimiento.

### 2.1. Marco Teórico.

De acuerdo a la tendencia nacional e internacional, se cita a John Moubray por ser el pionero en el mantenimiento centrado en confiabilidad –RCM- , quien es reconocido como uno de los expertos y consultor más prestigiosos y quien estructuró y desarrollo el RCM2; quien además sostiene que “*Los problemas del mantenimiento obtienen su mejor solución trabajando en dos etapas:*

*(1) cambiando la forma en que las personas piensan,*

*(2) logrando que apliquen esa nueva manera de pensar, a la resolución de problemas técnicos de proceso - un paso por vez<sup>3</sup>.*

La productividad se utiliza para medir la eficiencia, la cual es un factor importante que determina la forma cómo se están utilizando los recursos, de esta manera asegurar la productividad a un mejor nivel

---

<sup>3</sup> Moubray JM (1991) “Reliability Centred Maintenance”.

con el fin de garantizar una respuesta inmediata a las necesidades de las partes interesadas<sup>4</sup>. Dentro del desarrollo de un proceso productivo, el realizar la fase de mantenimiento de los equipos resulta ser uno de los factores que propicia la consecución de estos niveles esperados.

El objetivo principal de realizar mantenimiento consiste en la conservación de la función de los equipos a través de la reparación, cuidado básico, mejoramiento de los mismos, de las máquinas y herramientas requeridas para garantizar un nivel de productividad óptimo y alto en la mayoría de los casos y cumplir con los requerimientos del sistema de producción; se precisa entonces que el mantenimiento aporte confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y longevidad para los equipos que garanticen el funcionamiento adecuado de la empresa y del sistema productivo en general.

Bajo este contexto, se requiere de un mantenimiento gerenciado, aplicando principios administrativos dentro de la mejora continua como planear, hacer, verificar y actuar –Ciclo PHVA; lo que significa la protección de la inversión, la garantía de producción, seguridad del servicio y obedece a un proceso de planeación y programación adecuada donde se involucra a todas las partes interesadas<sup>5</sup>.

## **2.2. Surgimiento del mantenimiento centrado en confiabilidad, -RCM.**

Como todo proceso en evolución para conocer el estado actual y las tendencias futuras es importante conocer su pasado; en este sentido veamos cómo ha sido la evolución histórica del mantenimiento. Desde el inicio de la vida humana las herramientas fabricadas por el hombre se han perfeccionado día a día, debido a que éstas le permiten suplir sus necesidades físicas, psicológicas y medio ambientales<sup>6</sup>. Durante la primera revolución industrial, se consideró que para fabricar un producto cualquiera, era necesario emplear 90% de mano de obra y el resto lo proporcionaban las máquinas. Conforme el tiempo pasó y a través de los esfuerzos por mejorar su función haciendo las máquinas más rápidas y

---

<sup>4</sup> ISO 9001-2015.

<sup>5</sup> Caracterización ocupacional del mantenimiento. SENA. 2005.

<sup>6</sup> Jhon Mubray. Director de Aladón.

precisas, en la actualidad se consigue obtener un producto o servicio con máquinas que se encargan de elaborar más de 90% de éste, lo cual ha sido posible por la dedicación de algunas personas que empezaron a brindar cuidados básicos a las herramientas con las que hacían su trabajo, al igual que a los recursos físicos, este fue el inicio de un mantenimiento incipiente. Muchas personas dedicadas al mantenimiento, aún consideran que para obtener un buen producto, es suficiente que las máquinas trabajen adecuadamente y se mantengan en perfectas condiciones por sí mismas, esta idea es el motivo por el cual la industria continúa a la zaga.

En las instituciones de educación superior y escuelas técnicas aún se sigue enseñando y admitiendo que el mantenimiento sólo tiene que ver con la mecánica, armar, desarmar y componer máquinas.

Desde 1950 -Tercera Revolución Industrial, la máquina sólo constituye el medio para obtener un fin, que es el “satisfactorio” = producto más servicio, siendo desde esta perspectiva su razón de ser, por lo cual debemos considerar que una instalación industrial está constituida por el sistema equipo/satisfactorio. Normalmente el mantenimiento es considerado un gasto para más que un bien, y no un activo de la empresa, debido a esta consideración los estudios que se realizan son superficiales, poco profundos en causalidad, fiabilidad y análisis de falla. Hoy en día con el advenimiento de un nuevo concepto de mantenimiento, se crea la necesidad de establecer un protocolo o camino a seguir, para obtener información necesaria y analizar con claridad los puntos críticos y costosos del mantenimiento de un centro industrial o productivo. Una vez detectados hay que plantear soluciones tecnológicas y cuantificarlas económicamente y poder determinar su viabilidad económica y técnica que seguramente incidirá en la rentabilidad de la empresa.

Para la misma época nace el concepto de mantenimiento preventivo por reposición *-se pierde dinero si tengo que esperar a solucionar la avería y no produzco*; estadísticamente este tipo de mantenimiento resulta costoso, empieza bien pero su efectividad es cuestionable. Es el empresario el que en razón de los costos, ve a primera vista que la estrategia afecta la economía de la empresa.

En los años 60 y 70 nace el mantenimiento productivo total -TPM, su creador es Seiichi Nakajimi - vicepresidente de JIPM -Japan Institute of Plant Maintenance. Actualmente el TPM o su variante pragmática mantenimiento autónomo –el mantenimiento autónomo es, básicamente la prevención del deterioro de los equipos y componentes de los mismos llevado a cabo por los operadores y preparadores del equipo, es el modelo de referencia en el sector del automóvil y en muchas industrias manufactureras -farmacéuticas, alimentarias, metal/mecánicas. El TPM está sustentado en 12 fases y una de ellas contempla el mantenimiento planificado, no obstante el mantenimiento autónomo contempla la intervención que puede realizar el operario de forma básica y las intervenciones complejas y duraderas las realiza el equipo de mantenimiento con su personal idóneo y competente. Las primeras nociones sobre la problemática integral industrial nacen en el Reino Unido en los años 60, donde se anuncia una nueva disciplina llamada Terotecnología - es un concepto que relaciona tecnología y economía para incrementar la fiabilidad y optimización de los recursos en el mantenimiento industrial y su objetivo es incrementar la productividad de la empresa al menor coste posible.

Diversos estudios demuestran que alrededor de 80% de los costes de explotación, producción y mantenimiento de un activo industrial se determinan en la fase de ingeniería. Por ello como complemento del TPM, en Japón, desde hace varias décadas se maneja el concepto de prevención del mantenimiento, que implica la realimentación de las experiencias del mantenimiento hacia la ingeniería.

En la industria de procesos el desarrollo desde los años 50 empieza por otro camino, el modelo más avanzado que suple la carencia de mantenimiento planificado, aparece el concepto de sobremantenimiento, nace como una secuela negativa de demasiados paros planificados que aparte de costosos no resuelven el problema de baja fiabilidad de muchos activos; por ello, en los años 60 y 70 se

introduce el modelo del mantenimiento basado en estado o condiciones reales de activos industriales, popularmente llamado mantenimiento predictivo.

Los primeros pasos en este sentido, se dan cuando las intervenciones planificadas con reposiciones de elementos de máquinas a frecuencia fija, se empiezan a sustituir por las inspecciones cualitativas - gamas de preventivo. El Mantenimiento predictivo da otra dimensión a dichas inspecciones, ya que se basa en mediciones periódicas de variables de estado técnico -amplitudes de vibración y sus frecuencias, impulsos de choque, temperatura, presión, espesores, etc., observando la tendencia del cambio de niveles medidos en su comparación con ciertos patrones de referencia -ejemplo: normas de severidad de vibración. De esta manera, se organizan sistemas de auscultación de activos en operación para determinar sus necesidades reales de intervención correctiva, preventiva o de mejora, todo ello sin interferencia con la disponibilidad productiva de la instalación.

Al inicio de su implementación el mantenimiento predictivo, no es asequible debido a los altos costes de la instrumentación analógica. Se expande por los sectores estratégicos de la industria de procesos petroquímicas y energéticos, pero posteriormente a medida que pasa el tiempo y gracias a las mejoras tecnológicas se expande a químicas, cementeras, papeleras y gracias a una gran oferta tecnológica de instrumentos portátiles se implanta en los sectores manufactureros.

Así pues, parte del problema es que en la actualidad se ha olvidado o no se tiene en cuenta el cambio que la historia marcó y se sigue llamando equivocadamente “mantenimiento” a una labor que tiene facetas que contempla varios aspectos operativos como pueden ser seguridad y medio ambiente, calidad, producción y mantenimiento, la de preservar la maquinaria y la de mantener la calidad del producto que ésta proporciona es decir que en la actualidad existe un nuevo paradigma.

A continuación la figura 2, muestra las diferentes facetas de la gestión del mantenimiento actual

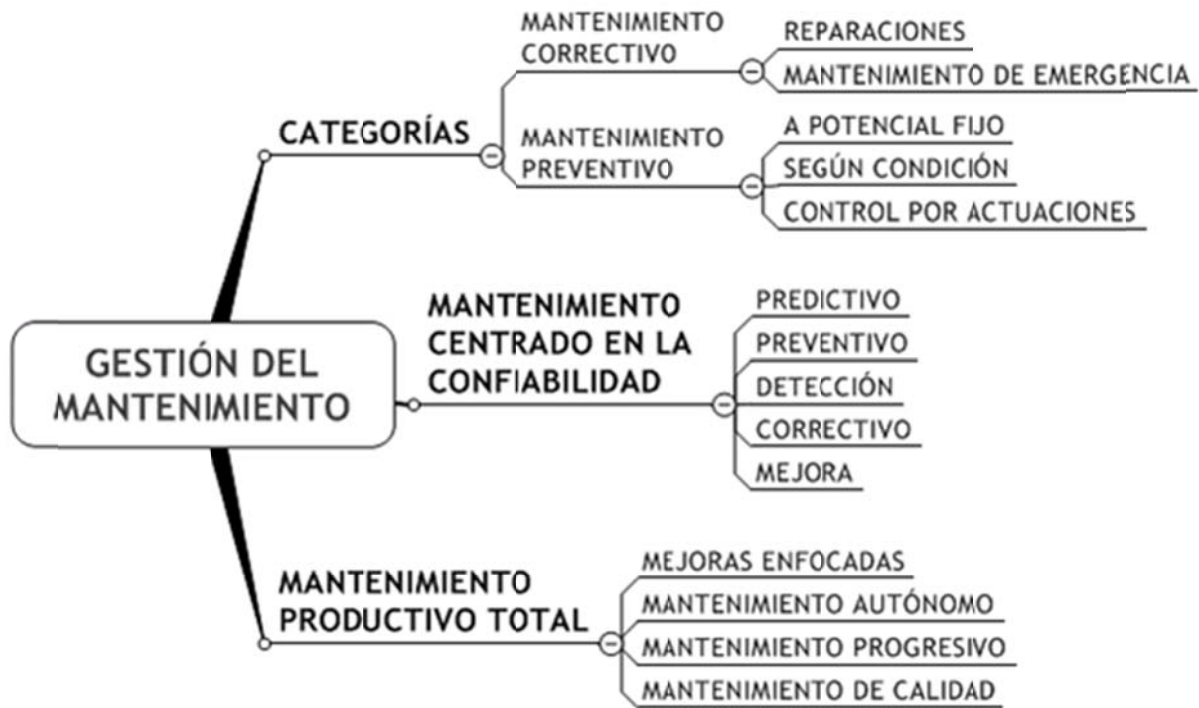


Figura 1. Gestión del Mantenimiento.

El Reliability Centered Maintenance -RCM fue desarrollado por Tom Matteson, Stanley Nowlan y Howard Hope de United Airlines, que a finales de los sesenta -70, describieron un proceso utilizado para determinar los requerimientos óptimos de mantenimiento en la industria aeronáutica, enfatizando en la generación de políticas empresariales que posibiliten una efectiva gestión de los riesgos de falla de la maquinaria y equipos del sistema productivo.

El RCM consiste en analizar las funciones de los activos, ver cuáles son sus posibles fallos, luego preguntarse por los modos o causas de los fallos, estudiar sus efectos y analizar sus consecuencias. A partir de la evaluación de las consecuencias se determinan las estrategias más adecuadas al contexto de operación, siendo exigido que sean no solo técnicamente factibles, sino que también sean económicamente viables.

Dicha metodología, que luego fue perfeccionada por John Moubray<sup>7</sup>, consiste en aplicar el conocido método de AMFEC -Análisis Modal de Fallos Efectos y Criticidad, aplicado al diseño y proceso en la industria, ampliándolo en la valoración de consecuencias. Se parte de las necesidades de cumplimiento de una misión por cierto activo expresado en términos de parámetro, preferiblemente medibles, luego se plantean posibles desviaciones de este cuadro paramétrico en términos de modos de fallos, posteriormente se plantean los efectos posibles, consecuencias y su criticidad. El RCM es un nuevo modelo de mantenimiento, es una metodología racional para determinar la integración óptima de los modelos conocidos de mantenimiento reactivo, proactivo, mejoras e incluso mantenimiento por detección de fallos ocultos, este enfoque representa un cambio radical en el desarrollo histórico del mantenimiento; antes del RCM, el preventivo y el planificado se centraba en los activos y el RCM se centra en las ubicaciones y procesos productivos. Un ejemplo de ello es el caso de una bomba de iguales características a otras lo que hacen que el mantenimiento se vuelva estándar y no se basan en las funciones que está bomba puede cumplir en diversos procesos donde interviene. Ahora la misma bomba tiene distintas aplicaciones y frecuencias de intervenciones de mantenimiento dependiendo de la criticidad del proceso donde intervenga.

Como muy bien define Moubray el RCM es una metodología para determinar las actividades de mantenimiento, reactivas y proactivas, con el objeto de optimizar la fiabilidad de los activos industriales, minimizando los fallos operacionales y/o sus consecuencias para la seguridad y medio ambiente, calidad, producción y mantenimiento de las instalaciones industriales.

Se trata pues el RCM de un análisis inductivo/deductivo que de hecho todos hacen intuitivamente, en mayor o menor medida en un ámbito industrial. La diferencia es que con esta metodología se “sistematiza el pensamiento” para evitar omisiones, prejuicios o juicios precipitados, conclusiones

---

<sup>7</sup> Fundador y Director General de Aladon Ltd. de Gran Bretaña.

prematuras, falta de detalle y rigor y otras deficiencias que surgen de la fiabilidad limitada de un análisis no sistemático<sup>8</sup>.

Considero que Moubray, analizó y sintetizó un modelo para todas las variables que pueden producir las fallas que se presentan en los equipos que están presentes en la industria de procesos y planteó una metodología que si nosotros como mantenedores seguimos al pie de la letra no se presentaría fallas en los equipos y/o por lo menos serían detectables a tiempo y prevenibles.

Con ello, se consigue analizar todas las causas que provocan un daño en una máquina o instalación. De muy buena ayuda ha servido esta herramienta analítica, para plantear las bases de una correcta actuación de los departamentos de mantenimiento de muchas industrias. Se puede llegar a dimensionar, la causa o causas que provocan cualquier fenómeno físico o químico en cualquier máquina, instalación o proceso productivo, y puede ser estudiado y analizado desde varios niveles de precisión y detalle.

Es así como un sistema de mantenimiento efectivo centrado en la confiabilidad –RCM, se fundamenta en dar respuesta sistemática y estructurada a las siguientes preguntas:

¿Cuáles son las funciones y sus estándares de funcionamiento en cada sistema?

¿Cómo falla cada equipo en relación con sus funciones?

¿Cuál es la causa de cada fallo funcional?

¿Qué pasa cuando ocurre cada fallo?

¿Cuál es el impacto real de cada fallo?

¿Cómo se puede prevenir cada fallo?

¿Qué debe hacerse si no es posible prevenir un fallo funcional?

Una vez contestadas estas preguntas, tendremos plenamente establecidas estrategias de mantenimiento absolutamente genéricas, que permitirán tener un mayor enfoque en cumplir las

---

<sup>8</sup> Marc Gardella González, mejora de metodología rcm a partir del amfec e implantación de mantenimiento preventivo y predictivo en plantas de procesos.

funciones de la empresa, y que podrán ser usadas en cualquier tipo de empresa o proceso. Las estrategias de mantenimiento aplicables para poner en marcha el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad –RCM, son las siguientes:

1. Mantenimiento predictivo o basado en la condición: Consiste en inspeccionar los equipos a intervalos regulares y tomar acción para prevenir los fallos o evitar las consecuencias de los mismos según condición. Incluye tanto las inspecciones objetivas utilizando con instrumentos y subjetivas realizadas a través de los sentidos, como la reparación del defecto o falla potencial.

Las técnicas utilizadas en el mantenimiento predictivo indican cuando los activos se encuentran en buen estado a pesar de haber sobrepasado las horas de funcionamiento recomendadas hasta una próxima intervención, también nos avisan cuando una máquina está desarrollando una avería –falla potencial, que requiere de una próxima y pronta intervención para su reparación.

2. Mantenimiento preventivo o basado en el tiempo: Consiste en reacondicionar o sustituir a intervalos regulares un equipo o sus componentes, independientemente de su estado en ese momento.

3. Mantenimiento de detección o búsqueda de fallos: Consiste en la inspección de las funciones ocultas, a intervalos regulares, para ver si han fallado y reacondicionarlas en caso de fallo.

4. Mantenimiento correctivo o a la rotura: Consiste en el reacondicionamiento o sustitución de partes de un equipo una vez que han fallado; es la reparación del fallo y ocurre de urgencia o emergencia.

5. Mantenimiento de mejora o rediseños: Consiste en la modificación o cambio de las condiciones originales del equipo o instalación.

Es importante señalar que el mantenimiento predictivo por sí solo no es la respuesta absoluta hacia un cambio sustancial en una estrategia macro de la gestión de activos de una empresa. Este hace parte de un enfoque más amplio del Mantenimiento Basado en Condición –CBM y es complemento de la Gestión de Activos y la Excelencia Operacional –óptima operación y cuidado básico de los activos, con

la que se debe contar para alcanzar los logros relevantes y de esta forma, llegar a aplicar el Mantenimiento proactivo, cuya finalidad es incrementar la vida productiva de los activos de una industria.

Desde esta perspectiva, este proyecto propone la creación de un modelo para la implementación exitosa del mantenimiento predictivo, que permita reducir el número de fallas prematuras de los equipos de superficie en una facilidad de la industria petrolera y logre extender significativamente la vida útil de sus componentes, el cual es una tarea fundamental de un Gerente de Mantenimiento.

Ahora voy a citar las definiciones de mantenimiento para lograr la comprensión del texto y darle una entidad propia dentro de la estructura de esta revisión bibliográfica y sus capítulos de desarrollo, dada su importancia en como a partir de ellas se llega al modelo de mantenimiento centrado en confiabilidad -RCM.

**Activo:** Es algo que tiene un valor potencial o real para una organización. Ejemplo: planta, instalación, maquinaria, edificios, vehículos, entre otros.

**AMFEC -Análisis de modos de fallos efectos y criticidad:** Un método cualitativo de análisis de confiabilidad el cual involucra el estudio de los modos de falla que pueden existir en cada componente de un ítem y la determinación de los efectos de cada modo de falla sobre otros componentes y sobre la función requerida del ítem.

**Árbol de fallos:** Sistema lógico secuencial de acontecimientos utilizado para el análisis de fiabilidad de un ítem.

**Avería:** Cese de la capacidad de un ítem para realizar su función específica. Equivale al término Fallo.

**Ciclo de vida:** Tiempo durante el cual un ítem conserva su capacidad de utilización. El período abarca desde su adquisición hasta que es sustituido o es objeto de restauración/rehabilitación.

**Control de Condición:** Comprobación del estado real de un ítem mediante control sistemático periódico o continuo de un parámetro significativo. Equivale a los términos control de estado y condition monitoring.

**Coste directo de mantenimiento:** Gastos en mano de obra propia, materiales de repuesto, servicios contratados, parte proporcional de los costes de supervisión y medios empleados en la reparación de la avería o reposición de un ítem. También se puede definir como el coste de evitación del daño o el coste de disponibilidad.

**Coste indirecto de mantenimiento:** Gastos derivados de las pérdidas de producción, rendimiento y calidad, y los daños a la seguridad y medio ambiente ocasionados por la avería de un ítem también se puede definir como el coste de la indisponibilidad.

**Disponibilidad:** Capacidad de un ítem para desarrollar su función en un determinado momento, o durante un determinado período de tiempo, en unas condiciones y con un rendimiento definidos. Puede expresarse como la probabilidad de que un ítem pueda encontrarse disponible para su utilización en un determinado momento o durante un determinado período de tiempo. La disponibilidad de un ítem no implica necesariamente que esté funcionando, sino que se encuentra en condiciones de funcionar. Una medida práctica de la disponibilidad de un ítem como parámetro de referencia es la definida por la relación entre tiempo de operación (tiempo real de funcionamiento correcto produciendo) y el tiempo total que se necesita que funcione (tiempo durante el que hubiese querido producir).

**Equipo:** Unidad compleja de orden superior integrada por conjuntos, componentes y piezas, agrupados para formar un sistema funcional (intercambiador de calor, transformador eléctrico). Equivale al término máquina.

**Fallo:** Cese de la capacidad de un ítem para realizar su función específica. Equivale al término avería.

**Fiabilidad:** Capacidad de un ítem para efectuar su función específica en unas condiciones y con un rendimiento definidos durante un período de tiempo determinado. Puede expresarse como la

probabilidad de que funcione correctamente en las condiciones operativas de diseño durante un determinado período de tiempo.

**Ficha histórica:** Registro de las incidencias, averías, reparaciones y actuaciones en general que conciernen a un determinado ítem. Equivale al término historial.

**Gestión de mantenimiento:** Actuaciones con las que la dirección de una organización de mantenimiento sigue una política determinada.

**GMAO:** Gestión de Mantenimiento Asistida por Ordenador.

**Ingeniería de mantenimiento:** Organismo consultivo que constituye el sistema de control de la dirección del mantenimiento, para corregir y mejorar la gestión. Su misión es perfeccionar las técnicas organizativas y los métodos y procedimientos de trabajo, favoreciendo la implantación de la Política de Mantenimiento más adecuada y el desarrollo de nuevas ideas.

**Ítem:** Sistema, subsistema, instalación, planta, máquina, equipo, estructura, edificio, conjunto, componente o pieza que pueda ser considerada individualmente y que admita su revisión o prueba por separado.

**Mantenibilidad:** Facilidad con la que puede realizarse una intervención de mantenimiento. Se puede expresar como la probabilidad de que un ítem averiado puede ponerse de nuevo en un estado operativo en un período de tiempo dado, cuando el mantenimiento se realiza con condiciones determinadas y se efectúa con los medios y procedimientos establecidos.

**Mantenimiento:** Conjunto de actividades técnicas y administrativas cuya finalidad es conservar, o restituir, un ítem en/a las condiciones que le permitan desarrollar su función.

**Mantenimiento por avería:** Mantenimiento efectuado a un ítem cuando la avería ya se ha producido, restituyéndole a condición admisible de utilización. Equivale al término Mantenimiento Correctivo (de preferible uso).

**Mantenimiento Centralizado:** Organización de Mantenimiento en la que el ámbito de actuación de cada uno de los oficios, especialidades o talleres se extiende a todo centro de trabajo.

**Mantenimiento Contratado:** Mantenimiento realizado por personal ajeno a la plantilla propia.

**Mantenimiento Correctivo:** Mantenimiento efectuado a un Ítem cuando la avería ya se ha producido, restituyéndole a Condición Admisible de utilización. El Mantenimiento Correctivo puede, o no, estar planificado.

**Mantenimiento Descentralizado:** Organización de Mantenimiento consistente en dividir el puesto de trabajo en áreas, zonas, plantas, etc., a cada una de las cuales se asigna un determinado personal.

**Mantenimiento de Emergencia:** Mantenimiento Correctivo que es necesario efectuar inmediatamente para evitar graves consecuencias.

**Mantenimiento de Mejoras:** Este tipo de mantenimiento abarca desde las pequeñas mejoras por la antigüedad de equipos (obsolescencia), mejoras procedentes de adecuación de instalaciones a fabricación de nuevos productos; así como, adecuación de instalaciones procedentes de nuevos proyectos.

**Mantenimiento en operación:** Acciones de mantenimiento que pueden efectuarse mientras el ítem está en operación.

**Mantenimiento planificado:** Mantenimiento organizado y efectuado con previsión y control. El Mantenimiento Preventivo siempre se planifica. El Mantenimiento Correctivo puede, o no, estar planificado.

**Mantenimiento Predictivo:** Mantenimiento Preventivo basado en el conocimiento del estado de un ítem por medición periódica o continua de algún parámetro significativo. La intervención de mantenimiento se condiciona a la detección precoz de los síntomas de avería.

**Mantenimiento Preventivo:** Mantenimiento que consiste en realizar ciertas reparaciones, o cambios de componentes o piezas, según intervalos de tiempo, o según determinados criterios, prefijados para reducir la probabilidad de avería o pérdida de rendimiento de un ítem. Siempre se planifica.

**Mantenimiento Programado:** Mantenimiento Preventivo que se efectúa a intervalos predeterminados de tiempo, número de operaciones, recorrido, etc.

**Mantenimiento de rotura:** Mantenimiento efectuado a un ítem cuando la avería ya se ha producido, restituyéndole a condición admisible de utilización. Equivale al término Mantenimiento Correctivo (de preferible uso).

**Mantenimiento según Condición:** Mantenimiento preventivo basado en el conocimiento del estado de un ítem por medición periódica o continua de algún parámetro significativo. Equivale al término mantenimiento predictivo (que es preferible).

**Mantenimiento de Seguridad:** Mantenimiento que está relacionado con las actuaciones en ámbito de seguridad y medio ambiente, ya bien puedan afectar a bienes y/o personas, de acuerdo con planes previamente establecidos.

**Mantenimiento de urgencia:** Mantenimiento correctivo que es necesario efectuar inmediatamente.

**Manual de Mantenimiento:** Recopilación de la información, datos y recomendaciones necesarias para el correcto mantenimiento de un Ítem.

**Matriz de Riesgos:** Representación gráfica de la matriz como una combinación de la probabilidad y consecuencia, usada como una base para la determinación cualitativa del riesgo. Las consideraciones para la evaluación de la probabilidad son mostradas en un eje. Las consideraciones para la evaluación de la consecuencia son mostradas en el otro eje. La intersección de las dos consideraciones en la matriz, da una estimación del riesgo.

**Máquina:** Unidad compleja de orden superior integrada por conjuntos, componentes y piezas, agrupadas para formar un sistema funcional (torno, compresor). Equivale al término equipo.

**Mejora:** Alteración efectuada a un ítem de la que se espera/obtiene un perfeccionamiento en su función.

**Niveles de Criticidad:** Niveles de severidad que se otorgan a un sistema cuando puede adoptar varios estados en los que puede surgir un suceso con mayores o menores consecuencias en medio ambiente, seguridad, calidad, producción y mantenimiento.

**Operación:** Situación de un ítem que está efectuando su función. Equivale a los términos en marcha y servicio.

**Orden de trabajo:** Instrucción escrita que define el trabajo que debe llevarse a cabo por la organización de mantenimiento.

**Parada General:** Situación de un conjunto de ítems al que se efectúa periódicamente revisiones y reparaciones concentradas y programadas en un determinado período de tiempo. Equivale al término reparación general cuando éste se refiere a una instalación o planta y tiene carácter periódico.

**Parada programada:** Parada debida a la interrupción no programada de operación de un ítem.

**Parametrizado:** Sistema compuesto por variables a los cuales se les ha determinado un parámetro o valor.

**Plan de Mantenimiento:** Relación detallada de las actuaciones de mantenimiento que requiere un ítem y de los intervalos con que deben efectuarse.

**Planificación del Mantenimiento:** Análisis y decisión previa de las actuaciones, secuencia, métodos de trabajo, materiales y repuestos, útiles y herramientas, mano de obra y tiempo necesario para la reparación de un ítem.

**Procesista:** Persona que utilizan métodos para implantar sistemas de gestión en una organización.

**Proactivo:** Método que supone trabajar de forma activa constantemente con el objetivo de mejora continua. El Mantenimiento Proactivo; además de utilizar los métodos más avanzados cuestiona constantemente los resultados que se obtienen y así se consigue mejorarlos.

**Programa Mantenimiento:** Documento que define la fecha prevista de realización de determinados trabajos de mantenimiento.

**Reactivo:** Método que se pone en marcha inmediatamente cuando ha surgido un suceso.

Mantenimiento Reactivo, es cuando se actúa de forma solamente y de forma inmediata cuando ha surgido en suceso o avería.

**Reparación:** Restitución de un ítem a condición admisible de utilización mediante el arreglo o reposición de las partes dañadas, desgastadas o consumidas.

**Repuesto:** Pieza, componente, conjunto, equipo o máquina perteneciente a un ítem de orden superior que sea susceptible de sustitución por rotura, desgaste o consumo. Equivale al término recambio.

**RCM -Reliability Centered Maintenance.** Mantenimiento centrado en la fiabilidad. Método que busca sistematizar y viabilizar las posibles formas de fallar de un sistema en su fase de diseño o de funcionamiento.

**Terotecnología:** Conjunto de prácticas de dirección, financieras, técnicas y de otros tipos que se aplican a activos físicos para reducir los costes del ciclo de vida. Comprende la especificación y diseño de Ítems teniendo en cuenta su fiabilidad y mantenibilidad, incluyendo su construcción, montaje, instalación, puesta en operación, mantenimiento, reposiciones, mejoras y reformas, con retro-información sobre diseño, rendimiento, comportamiento y costes.

**Tiempo de Ejecución:** Período de tiempo en que una o más personas, o un sistema automático, están realizando a un ítem trabajos de mantenimiento.

**Tiempo de inactividad de mantenimiento:** Período de tiempo en el que el mantenimiento no trabaja en un ítem que está fuera de servicio a causa de una avería, por razones ajenas al propio mantenimiento -horario de trabajo establecido, huelgas, etc.

**Tiempo de inactividad de operación:** Período de tiempo en el que un ítem está disponible para desarrollar su función, pero no es utilizado por falta de mercado, huelgas, falta de materias primas o energía, etc.

**Tiempo de operación:** Período de tiempo en el que un ítem está realizando su función.

**Tiempo de parada:** Período de tiempo en el que un ítem no está en operación.

**Tiempo de preparación y espera:** Período de tiempo en el que el mantenimiento no trabaja en un ítem que está fuera de servicio a causa de una avería, por razones atribuibles al propio mantenimiento (falta de personal, útiles, herramientas o repuestos, desplazamientos, etc.).

**Tiempo medio entre fallos -MTBF:** Tiempo medio entre averías sucesivas de un ítem reparable. Se representa como TMEF y es inverso a la tasa de fallos.

**Tiempo medio de reparación -MTTR:** Tiempo medio necesario para reparar un ítem. Se representa como TMDR.

**Tiempo de parada:** Período de tiempo en el que un ítem no está en operación.

**Tiempo de reparación y de espera:** Período de tiempo en el que mantenimiento no trabaja en un ítem que está fuera de servicio a causa de una avería, por razones atribuibles al propio mantenimiento -falta de personal, útiles, herramientas o repuestos, desplazamientos, etc.

**TPM:** Total Productive Maintenance. Mantenimiento Productivo Total. Sistema de organización de trabajo en el que el parte de mantenimiento -limpiezas, engrases, aprietes, cambios de herramientas y piezas de desgaste, pequeñas reparaciones y comprobaciones, inspección visual, lo realiza el operador del equipo o máquina, quedando a cargo de la propia organización del mantenimiento las inspecciones, revisiones y reparaciones de mayor entidad.

**Tribologías:** Conjunto de conocimientos, técnicas y prácticas relativas al rozamiento y la lubricación.

**Vibración:** Movimiento oscilante respecto a una posición de referencia de las partículas de un cuerpo sólido.

### 2.3. Generalidades del proceso de producción del petróleo.

En este aparte se presenta una síntesis del proceso de producción del petróleo para entrar en contexto sobre la importancia de este hidrocarburo y por ende comprender la rigurosidad con que los equipos que son empleados en todo este proceso del ciclo de producción del petróleo deben ser confiables y tener una alta disponibilidad, ya que si estos dos indicadores no se dan, el proceso se desestabiliza.

Comenzamos por saber que el petróleo es un líquido aceitoso de color generalmente oscuro a ámbar, sus componentes principales son el carbono y el hidrogeno, aunque puede contener azufre, oxígeno, agua y trazas de otros componentes como sales y metales. En condiciones de producción pueden generarse líquidos o en su caso gases que se desprenden del mismo y de acuerdo a la composición del hidrocarburo. Su origen está relacionado con procesos de sedimentación y transformación a lo largo de millones de años. Este proceso complejo en el interior de la tierra descompuso las materias orgánicas de diverso origen como el fitoplancton, zooplancton, materias animales y vegetales que se reunieron en grandes lechos, además de condiciones favorables de capas de rocas y sedimentos hasta transformar estas materias en hidrocarburos a lo largo de millones de años.

El petróleo es una mezcla de hidrocarburos e impurezas, entre las cuales se encuentran compuestos orgánicos de azufre, oxígeno y nitrógeno.



Figura 2. Muestras de Crudo. Fuente Ecopetrol.

#### **2.4. Etapas previas a la producción de pozos de petróleo.**

Una vez terminada la perforación y haber atravesado la formación que constituye el objetivo del pozo, se toman una serie de registros eléctricos, los cuales entre otras cosas, permiten determinar las características de la roca almacenadora y la clase de fluido almacenado -petróleo, agua, gas, junto con algunas de sus propiedades. En la figura4, se puede apreciar un equipo de perforación de pozos petroleros, en estos equipos se aplican técnicas de mantenimiento basado en condición –predictivo, donde se realizan pruebas de aceite a motores de combustión interna y vibraciones en los equipos de tratamiento de lodo.



Figura 3. Equipo de perforación. Fuente Ecopetrol.

Del análisis de los registros eléctricos y de otra información tomada durante la perforación, se puede definir con bastante aproximación la comercialidad o no de un pozo. Una vez aprobada su comercialidad, se procede a proteger el hueco perforado, ya que a estas condiciones las paredes del pozo resisten solamente pocos días antes de derrumbarse, por lo cual es necesario darle estabilidad, aislar unas zonas de otras y permitir el control de los fluidos que se van a producir. Esto se logra por medio de un revestimiento que es un tubo metálico que se baja dentro del hueco perforado, se cementa en el espacio anular entre el tubo y la roca. Una vez realizado el revestimiento, se procede con una etapa conocida como completamiento en la cual se realizan una serie de actividades con el fin de que el petróleo o gas encontrado en una o varias rocas, pueda ser traído a superficie para su aprovechamiento. Finalizada esta etapa, se procede a la operación de cañoneo; la cual consiste en perforar el tubo de acero junto con el anillo de cemento y penetrar unas cuantas pulgadas dentro de la formación.

## 2.5. Métodos de producción del petróleo.

Si el fluido almacenado en la formación tiene suficiente energía -presión, podrá desplazar el fluido que se encuentra llenando el tubo y de esta manera fluir a superficie hasta las instalaciones de producción –esto se denomina flujo natural y por ende no requiere de equipos adicionales de bombeo. Si no tiene suficiente energía, será necesario inducir el flujo hasta superficie instalando sistemas de producción, entre los cuales se tienen -bombeo mecánico, -bomba operada por varillas, -neumático, -gas lift, -hidráulico, -bomba reciprocante operada por líquido bombeado desde superficie, -bomba electrosumergible, -bombas centrífugas multietapas operadas por motor eléctrico acoplado directamente a la bomba, estos equipos tienen su hoja de vida y se le realiza un análisis denominado FMEA –Failure Mode and Effects Análisis, -Análisis de modos de falla y efectos, el cual determina los tipos de mantenimiento a implementar y aplicar en los equipos para garantizar confiabilidad y disponibilidad.

## 2.6. Flujo natural.

Es el proceso en el cual el petróleo fluye a la superficie a causa de la energía -diferencia de presiones entre yacimiento y la superficie, suministrada por:

- El gas que se encuentra sobre la capa de petróleo en el yacimiento o el gas que se encuentra disuelto dentro de la capa de petróleo.
- Fuerza de empuje generada por la capa de agua ubicada debajo del petróleo.
- La compactación de las capas de tierra debido al proceso de explotación.

Este es el método de producción más económico, y es por eso que una gestión adecuada de la producción del pozo de una manera natural, maximizará la rentabilidad del yacimiento, para ello es recomendable la utilización de estranguladores o choques en pasos de flujo natural para mantener la energía del gas y controlar la producción y la presión del pozo.

Una vez que el pozo no puede fluir por sí mismo, se requiere instalar métodos artificiales de producción, para compensar la pérdida de energía.

## **2.7. Métodos Artificiales.**

### 2.7.1. Bombeo Mecánico.

Es el que se lleva a cabo por medio de una unidad de bombeo que acciona una sarta de varillas, las cuales a su vez, accionan una bomba de pistón instalada en el extremo inferior de la tubería de producción. Generalmente usado para petróleos viscosos y pesados. El equipo consta de las siguientes partes principales:

Unidad de Bombeo Mecánico -Equipo de superficie: Es un balancín destinado a imprimir un movimiento ascendente y descendente a la sarta de varillas. Consta de un motor eléctrico, un reductor de velocidad, contrapesas, entre otros mecanismos. El balancín está construido de tal manera que permite aumentar o disminuir la velocidad de operación, aumentar o disminuir la carrera ascendente o descendente y aumentar o disminuir la carga en las contrapesas con el fin de acondicionarla a la capacidad de producción del pozo. Ver figura5. A estos equipos se les programa mantenimiento preventivo cada 15 días, también se les realiza una inspección visual para identificar ruidos anormales y fugas por sellos, estas rutinas salen del diagnóstico y evaluación de la técnica definida durante el proceso de análisis –RCM, estas estrategias implementadas han dado buen resultado ya que los equipos no se detienen por fallas que no hayan sido detectadas a tiempo.



Figura 4. Unidad de Bombeo Mecánico. Fuente: Hocol.

**Bomba de Subsuelo:** Es un tubo de acero dentro del cual funciona recíprocamente un embolo o pistón el cual desplaza el fluido proveniente de la formación hacia el exterior. La bomba posee válvulas en su extremo inferior y en el pistón viajero, de tal manera que en su carrera ascendente permite la entrada de fluido al cuerpo de la bomba y en la carrera descendente permite que el fluido pase a la parte superior del pistón, que al viajar nuevamente hacia arriba, obliga al fluido que está dentro del tubing a salir hacia la superficie. Ver figura 6. Estas bombas presentan fallas ocultas, que son detectadas mediante un proceso denominado sonolog, en donde se miden presiones para evidenciar pase en los sellos y así de esta manera poder llevar a cabo un mantenimiento programado de tal manera que el equipo no deje de cumplir su función totalmente y evitar paros no programados.

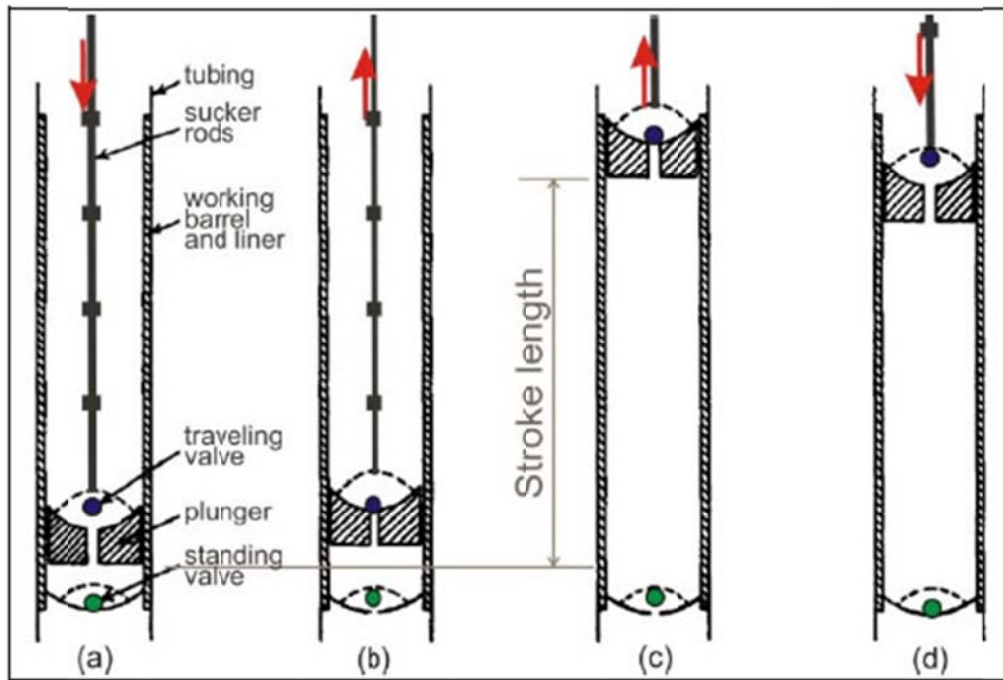


Figura 5. Bomba de subsuelo. Fuente Ecopetrol.

Varillas: Son las que conectan el balancín que está en superficie, transmitiendo el movimiento ascendente y descendente. Los diámetros más usados son 5/8", 3/4", 7/8" y 1". La longitud de cada varilla es de 25 pies, y son conectadas entre sí por medio de roscas. Ver figura7. En las varillas se realizan pruebas END –ensayos no destructivos, para determinar la integridad del metal y la resistencia a tracción.

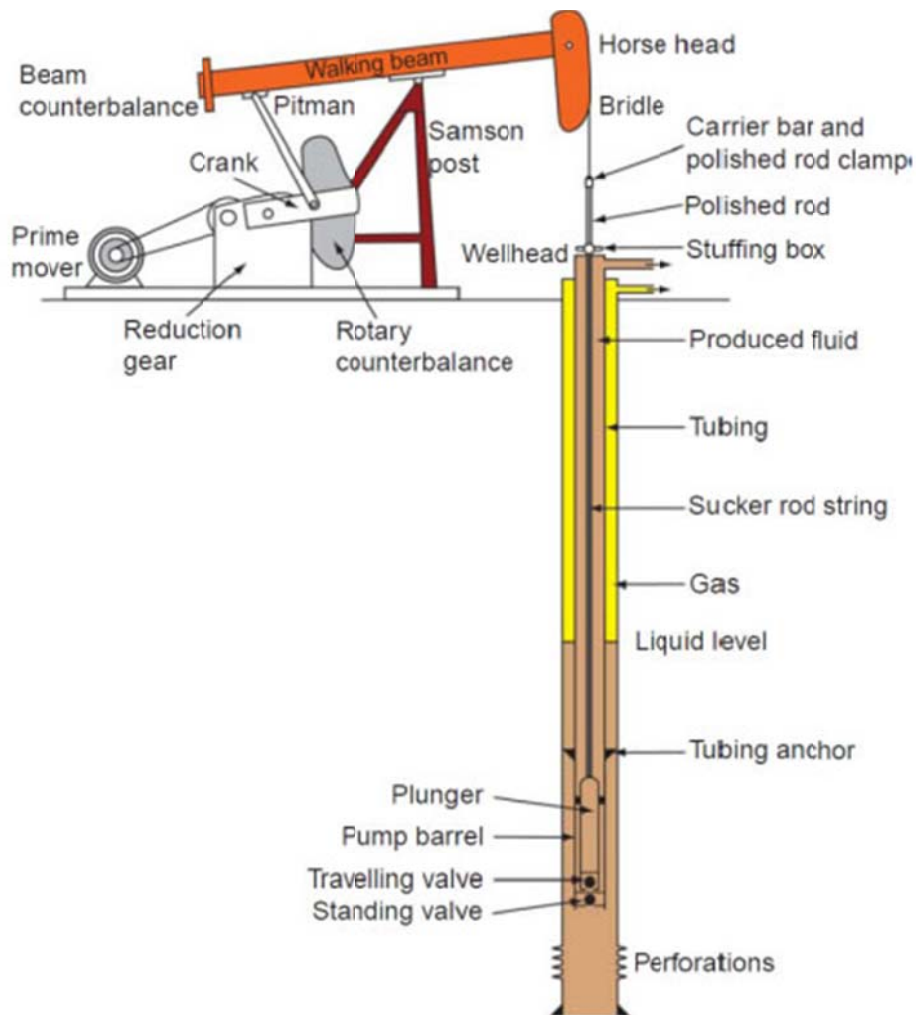


Figura 6. Varillas de conexión. Fuente Ecopetrol

### 2.7.2. Gas Lift.

Se utiliza gas comprimido como fluido motriz, el cual logra una o varias de las siguientes acciones:

Aireación de la columna de fluido, disminuyendo así su peso.

Por expansión del gas comprimido al ascender por la columna de fluido, actuando como pistón.

Por desplazamiento de la columna de líquido al entrar el gas bombeado.

Consiste en bombear gas a través de una válvula, lo que favorece el ascenso de la columna de fluido que se encuentra en el tubing, hacia superficie. Cuando el líquido llega a superficie, no hay razón para mantener la circulación de gas por lo cual puede ser suspendida y se da espacio para que un nuevo volumen de fluido invada la tubería de producción debido a la disminución de la altura de la columna

de fluido. Esta operación se lleva a cabo cíclicamente y se logra producir una cantidad de líquido igual al aporte de la formación. Ver figura 8.

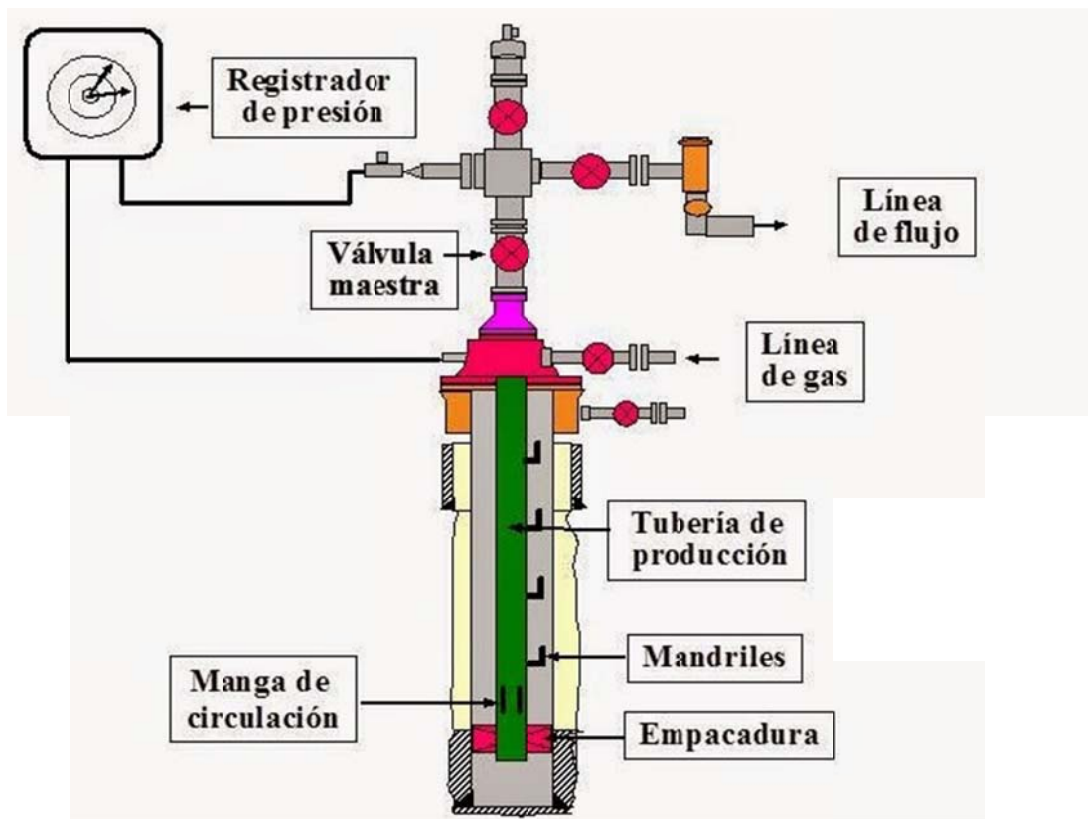


Figura 7. Gas lift. Fuente: Ecopetrol

### 2.7.3. Bombeo hidráulico.

Básicamente, este método utiliza una bomba recíproca instalada en el fondo de la sarta de producción, la cual es operada por medio de un líquido bombeado desde superficie, el cual acciona un pistón de manera recíproca. La diferencia con el bombeo mecánico, radica en que la potencia en este método es transmitida por medio de un líquido de potencia y no por medio de varillas como lo hace el bombeo mecánico. Estas bombas tienen limitaciones en cuanto a volumen y profundidad de instalación. En los casos en los que se requiere bombear grandes volúmenes, se utilizan unas bombas “jet” en las cuales el fluido de potencia pasa por una boquilla a gran velocidad, la cual causa un vacío que arrastra el fluido de pozo y lo impulsa a superficie.

#### 2.7.4. Bombas electrosumergibles.

Estas bombas son centrífugas multietapas operadas por un motor eléctrico, el cual va acoplado directamente a la bomba. El conjunto motor/bomba es instalado en el extremo inferior de la sarta de producción. Los rotores del motor van en la parte inferior y los “impellers” de la bomba en la parte superior. El tamaño de la bomba es controlado por el tamaño del revestimiento; sin embargo este tipo de bombas se caracterizan por mover grandes volúmenes de fluido a grandes profundidades.

El sistema básico consta de un motor eléctrico, una sección de sello, una sección de entrada de fluido, una bomba centrífuga multietapa, cable eléctrico, panel de control y transformadores.

#### 2.7.5. Facilidades de superficie.

Una instalación de superficie, llamada en el ambiente petrolero, EPF Early Production Facilities, batería de producción o estación de producción es el grupo de equipos, instalaciones y elementos que permiten tomar los fluidos provenientes de pozos productores de crudo -crudo, agua, gas y sólidos, separarlos en cada una de sus fases, analizarlos, tratarlos, medirlos y despacharlos a su destino predeterminado.

El diseño de los sistemas de producción –facilidad, guarda estrecha relación con la cantidad y calidad de los fluidos que se esperan producir; no es lo mismo producir solamente gas en grandes volúmenes y alta presión, que petróleo con una baja relación gas/aceite y con alto volumen de agua. Cada uno de los sistemas del ejemplo anterior requiere diferentes equipos, dimensiones y consideraciones en general para el diseño de una facilidad. Ver figura 9.

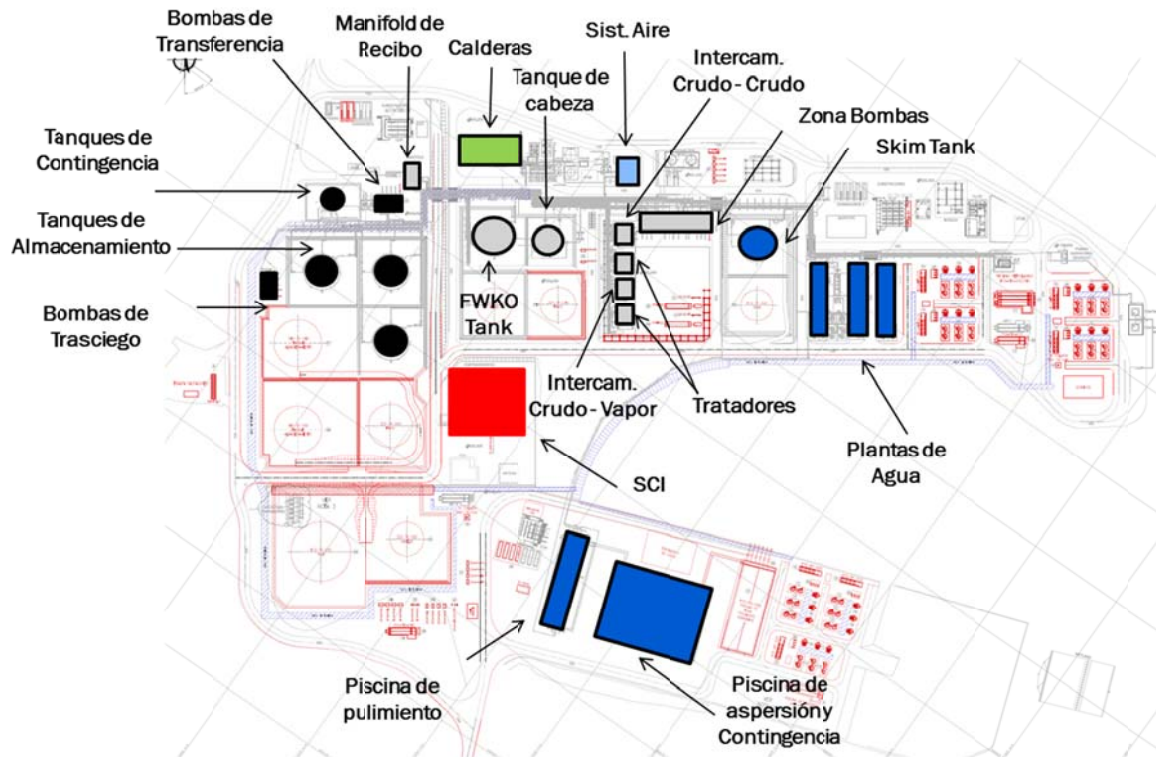


Figura 8. Vista de una facilidad de producción. Fuente: Hocol

En una batería todos los pozos llegan a un sitio común denominado manifold o múltiple.

Manifold de Recoleccion: -Son colectores donde confluyen más de dos líneas de flujo. Recolectan la producción de diferentes pozos y tienen la opción de transferir una producción total y una producción individual y desde este punto cada pozo es enviado a un sitio determinado de la batería de producción o facilidad de producción, que puede ser un tanque, separador, calentador, etc. La operación más común que se lleva a cabo en un MANIFOLD o múltiple es generalmente direccionar un pozo hacia un SEPARADOR de prueba con el fin de determinar su producción, con la ayuda de elementos y equipos de medición instalados en el mismo. Ver figura 10. En el múltiple se realiza una técnica denominada RBI –Risk Based Inspection, inspección basada en riesgo, es una técnica donde la tubería se inspecciona mediante un scanner para determinar pérdidas de material y de acuerdo con el % de pérdida, determinar su reparación antes de que pierda integridad y sucedan incidentes no deseados.

Otros equipos que normalmente se encuentran en una facilidad son tanques de almacenamiento, tratadores térmicos, intercambiadores de calor, bombas, válvulas, medidores de flujo, controladores, compresores, generadores e instalaciones complementarias.



Figura 9. Múltiple de recibo. Fuente: Hocol

## 2.8. Accesorios y equipos.

### 2.8.1. Manifold de producción.

Como se dijo anteriormente es el primer lugar de recibo de fluidos provenientes de los pozos, desde donde a través de un sistema de válvulas se direccionan dichos fluidos hacia determinado equipo de la facilidad, según la operación a realizar. El manifold permite el manejo total o individual del flujo de los diferentes pozos para la medición y recolección del petróleo y facilitar trabajos de reparación. En la figura 11, se puede apreciar un árbol de producción en cabeza de pozo.



Figura 10. Árbol de navidad cabezal de pozo. Fuente: Hocol.

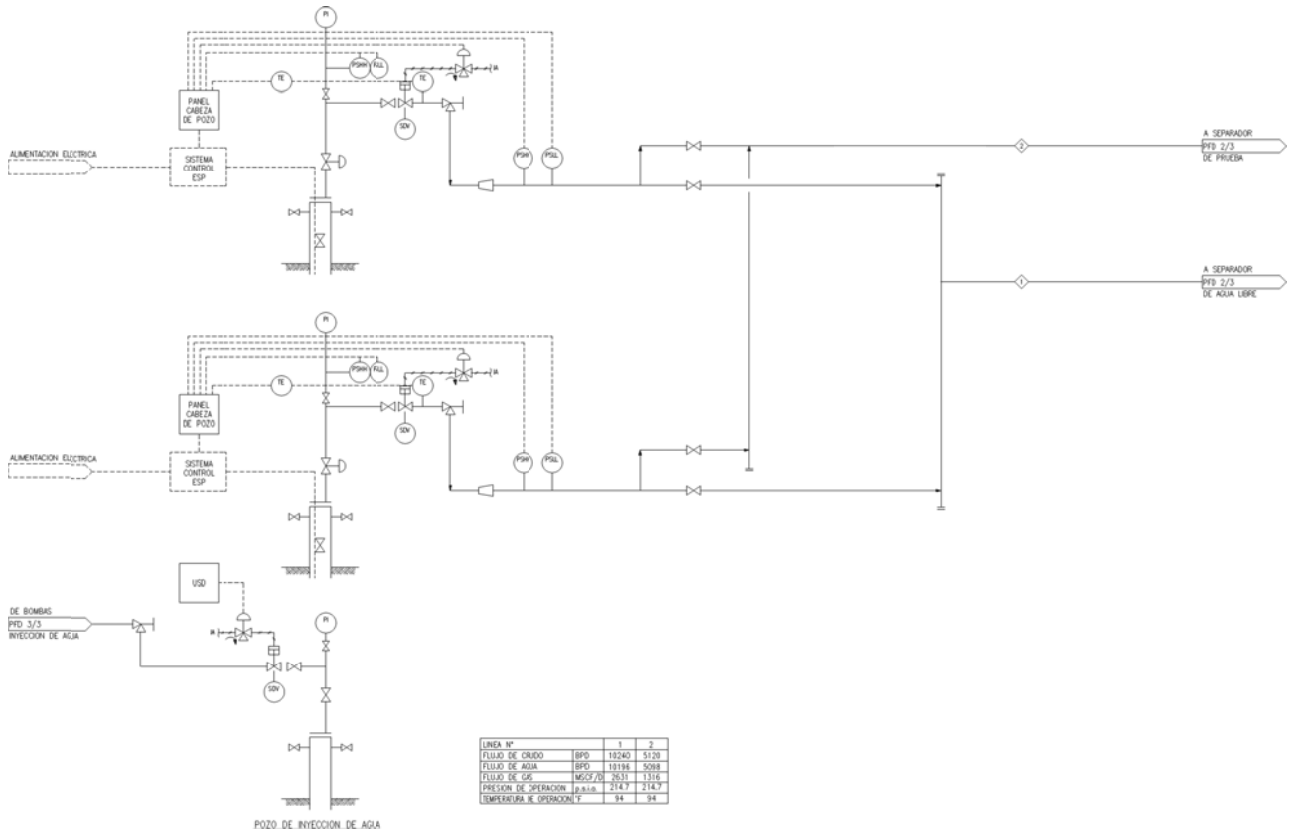


Figura 11. P&ID. Cabezal de pozo a manifold de producción. Fuente: Hocol.

### 2.8.2. Válvulas.

Son mecanismos para controlar el flujo de fluidos -líquidos y gases, Pueden ser operadas manual o automáticamente. La operación automática puede ser de tipo eléctrico o neumático. Las válvulas manuales pueden convertirse en automáticas colocándoles un actuador. Existen diferentes tipos, dependiendo de su uso o aplicación, las manuales más comunes son:

### 2.8.3. Válvulas de compuerta.

Una compuerta permite o no -parcial o totalmente, el flujo a través de ella. Generalmente son válvulas grandes y la compuerta se abre o cierra por medio de un volante, ver figura 13. Estas válvulas tienen la función de contener el petróleo y controlarlo para que no haya sobre presiones y flujo de fluidos en sentidos no deseados, el mantenimiento es riguroso debido a la criticidad del proceso.



Figura 12. Válvula de compuerta. Fuente: Hocol

#### 2.8.4. Válvulas de bola, tapón y mariposa.

Estas son similares en su operación y diseño. Se caracterizan por girar  $\frac{1}{4}$  de vuelta dentro de su cuerpo para obtener posición abierta o cerrada. Una manija hace girar la bola, el tapón o el disco y esta es un indicador de la posición de abierto o cerrado. Si la manija está paralela a la tubería, la válvula se encuentra abierta, en caso contrario -perpendicular a la tubería, la válvula se encuentra cerrada, ver figura 14. Estas válvulas cumplen una función importante dentro de la contención y manejo del petróleo, un mantenimiento no planificado traería consecuencias al medio ambiente y a las personas.

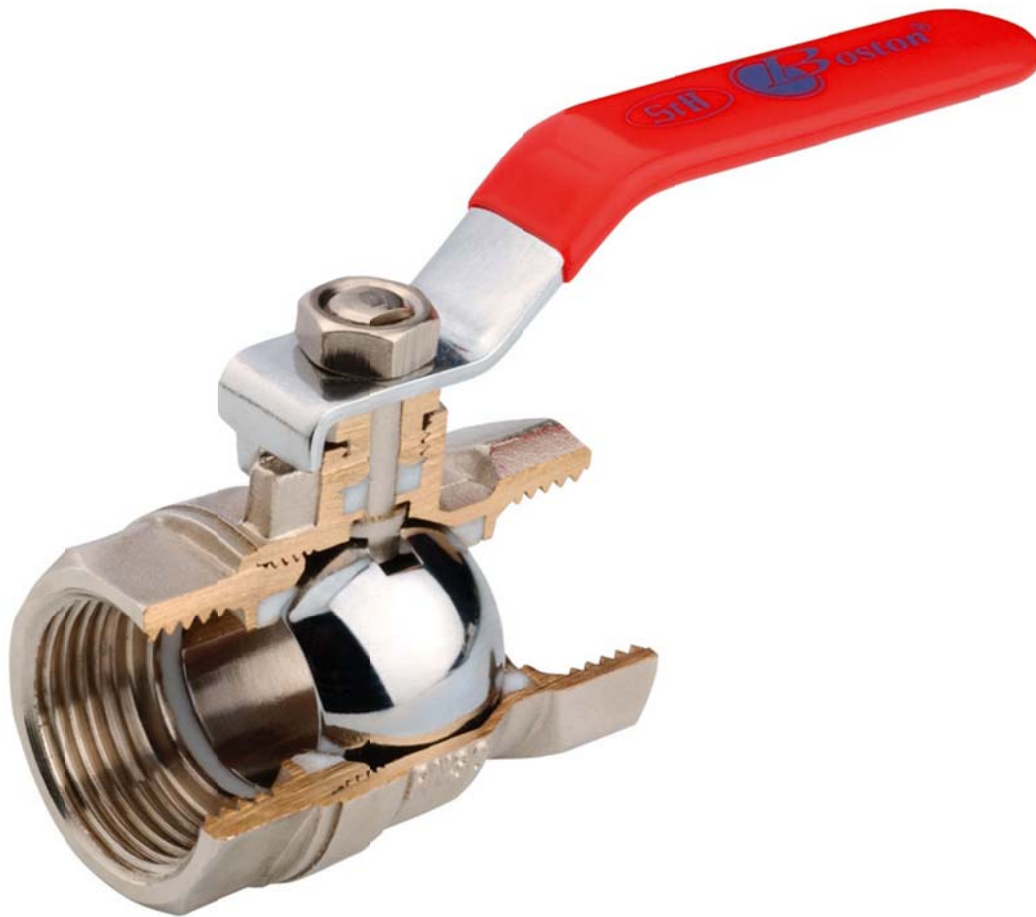


Figura 13. Válvula de bola. Fuente: Hocol

### 2.8.5. Válvulas de control-manual.

La válvula de aguja es un ejemplo de este tipo de válvulas. Consiste en una pieza cónica que va en el extremo inferior de la válvula, la cual desciende con el vástago hasta sellar completamente en los asientos. No se puede saber a simple vista en qué posición se encuentra. Para comprobarlo, gire el volante en el sentido de las manecillas del reloj. Si al dar dos vueltas el volante, este sigue girando libremente, la válvula debe estar abierta. Al igual que las válvulas de compuerta, para abrir o cerrar totalmente, el volante debe girarse  $\frac{1}{4}$  de vuelta en sentido contrario. Estas válvulas son por lo general son pequeñas y se utilizan para regular el flujo. En la figura 15, se puede apreciar los tipos de válvulas.

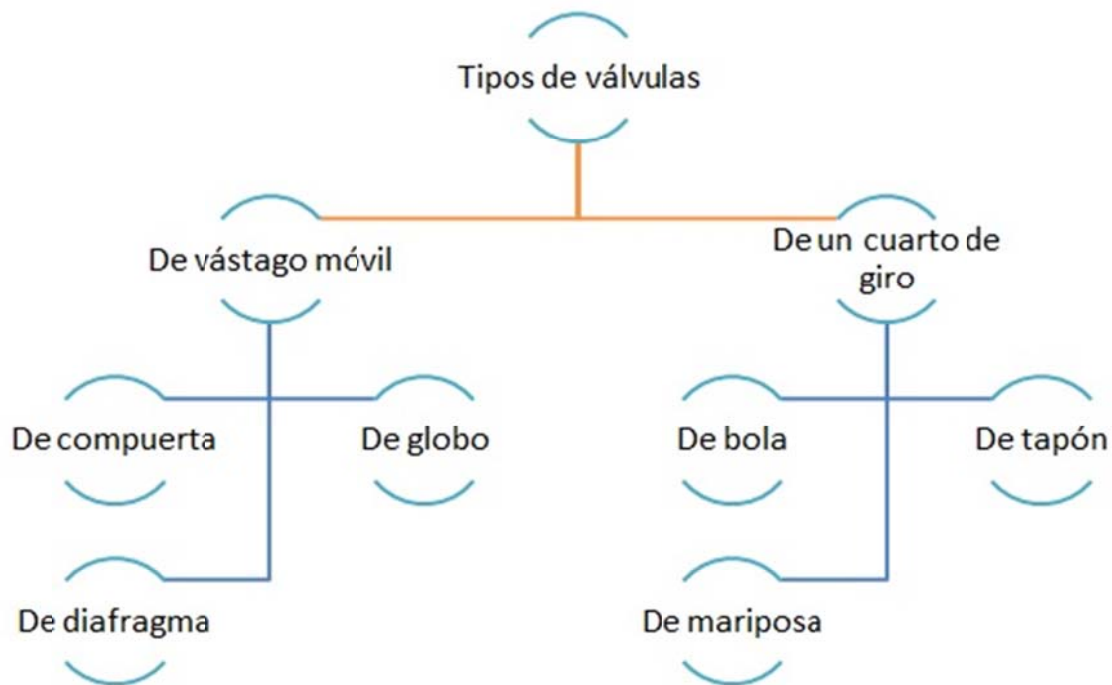


Figura 14. Tipos de válvulas. Fuente: Hocol SA.

### 2.8.6. Separadores.

La separación es una operación unitaria realizada en las facilidades de producción de petróleo para segregar los fluidos de los pozos. Esta segregación es realizada con propósitos definidos: primero, obtener inicialmente los fluidos -gas/líquidos, libres unos de otros; segundo, permitir la prueba o medición de los tres fluidos básicos que componen la corriente de producción por pozo, función del separador de prueba; tercero, asegurar que el petróleo es liberado del gas también presente en la emulsión en forma de anillo alrededor de las gotas de agua dispersas en él, está es una función de todo separador conocida como método mecánico de rompimiento o eliminación de emulsiones. Finalmente la separación asegura que el petróleo quede exento de componentes muy livianos los cuales son indeseables en posteriores etapas del proceso; esto es el fin del recobro de vapores del desgasificador y desde los tanques finales de almacenamiento de crudo. En la figura 16, se pueden apreciar separadores instalados en una facilidad de producción de petróleo.



Figura 15. Separadores. Fuente: Hocol SA.

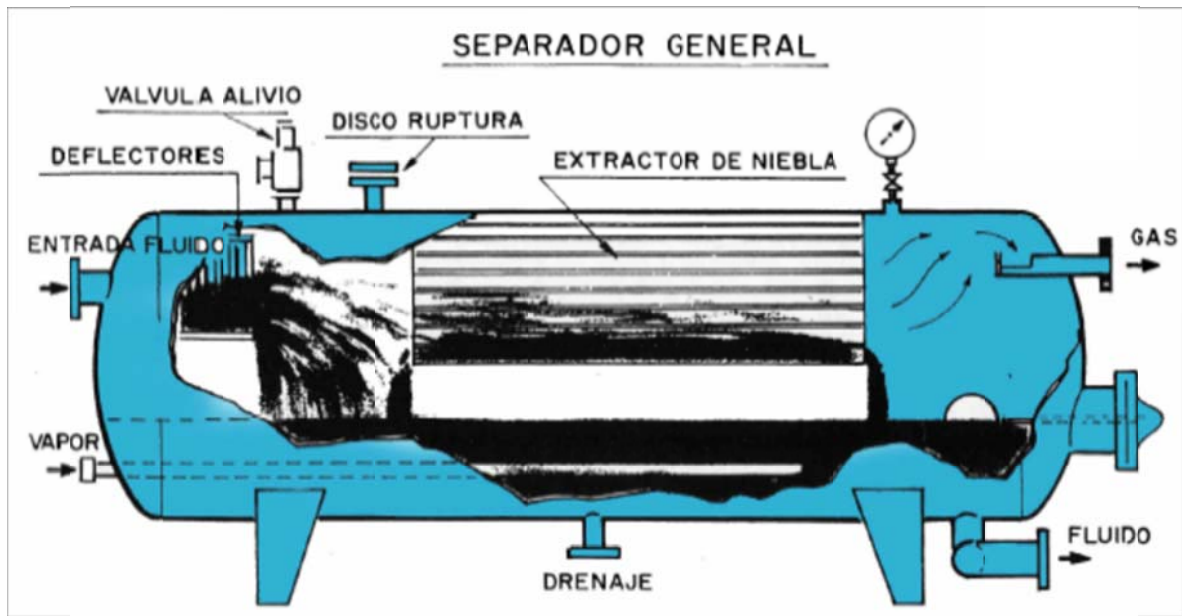


Figura 16. Esquema de un separador bifásico horizontal. Fuente: Hocol SA.

#### 2.8.7. Tratadores térmicos.

En muchos de los casos para poder separar las diferentes fases de la mezcla proveniente del fondo del pozo, no es suficiente con la separación física y/o química, y se hace necesario el uso de equipos llamados tratadores térmicos, que básicamente son recipientes a presión con dispositivos adecuados para proporcionarle calor a la mezcla usando calderas que transfieren dicho calor a los tratadores por medio de capilares o tubos de fuego.

Ese calor proporcionado sirve para eliminar la emulsión que se forma entre las fases agua/aceite y ayudar a la separación química que se hace con productos químicos.

En otras palabras, son recipientes calentadores a presión, los cuales usan químicos para finalizar la separación del petróleo, gas y agua emulsionados. La mezcla entra al tratador e inicialmente se le permite al agua libre que se separe del aceite y la emulsión, luego, la mezcla pasa a una zona de calentamiento y finalmente a una zona de coalescencia y asentamiento, donde permanece un determinado tiempo en reposo para permitir la separación de fases. El fluido o mezcla antes de entrar al tratador, se le debe haber agregado un agente demulsificante. Estos equipos presentan pérdida de

espesores por corrosión debido a las altas temperaturas y el agua con que trabaja y por ende se garantiza un mantenimiento proactivo para evitar que hayan fugas o explosiones debido a la pérdida de integridad del material.

#### 2.8.8. Intercambiadores de calor.

Pueden ser directos o indirectos dependiendo de si están en contacto o no con el elemento que proporciona calor. Dentro de los directos, el más común es el de tipo tubular, en el cual el petróleo fluye a través de los espacios entre una cámara y los tubos de fuego, dentro de los cuales se quema gas. El calor generado por la superficie de estos tubos, calienta el crudo. Es usado para emulsiones no corrosivas a baja presión, son eficiente, económicos, pero por su alto calentamiento, se desperdician hidrocarburos livianos y requieren supervisión por el peligro que conlleva su diseño. Su capacidad varía hasta 5000 bbls/día para aumentar la temperatura hasta 150°F. Los mantenimientos que se realizan al equipo son programados y con parada del equipo, ya que por su peligro de contacto con alta temperatura y volatilidad del gas se hace necesario realizarlo con el equipo fuera de línea y asegurando las energías peligrosas.

En los de tipo indirecto, la emulsión fluye a través de tubos sumergidos en agua y esta se calienta por contacto con el elemento de calentamiento. Su operación es más segura y de fácil control. Su principio se aplica en los tratadores térmicos.

#### 2.8.9. Medidores de flujo.

Uno de los objetivos fundamentales de la instalación de superficie y en la mayor parte de operaciones realizadas en cualquier tipo de proceso industrial es el de poder medir y evaluar todos sus procesos lo cual permite generar programas de desarrollo que permitan su optimización. Existen varios métodos para medir el caudal según sea el tipo volumétrico o másico. La calibración de estos equipos son la estrategia que se aplica en ellos y se realizan cada tres -3, meses, este equipo es crítico para el proceso ya que es donde se fiscaliza el producido que redundará en ingreso de dinero.

### 2.8.10. Bombas.

Una bomba es básicamente, un mecanismo construido para transportar o mover líquidos de un lugar a otro. Podemos clasificarlas esencialmente en dos tipos: centrífugas y de desplazamiento positivo.

### 2.8.11. Bombas centrífugas.

Estas bombas son utilizadas en aplicaciones donde se tiene que mover un gran volumen de fluido.

Dentro de un campo de petróleo o facilidad, este tipo de bombas pueden ser vistas en trabajos como proveer agua en caso de incendios, vaciar tanques de almacenamiento, mover fluidos de proceso en plantas de gas, circular agua en torres de enfriamiento y en muchas otras aplicaciones. Debido a su poco mantenimiento, la simplicidad en su construcción y operación, estas bombas presentan un menor costo. Las partes más importantes son:

**La Carcaza:** La cual almacena y protege las partes internas.

**El Impulsor:** Es la parte que imparte energía al fluido bombeado. Este va unido al eje y rota a su velocidad.

**El Eje:** Va unido al eje del motor por medio de un acople, el cual debe ser lo suficientemente fuerte para resistir los cambios repentinos en la carga de la bomba y cuando se detenga el accionador. El eje, transmite la energía que proporciona el motor al Impulsor.

**Las Balineras:** Son las que soportan el eje y reducen la fricción cuando este rota dentro de la carcaza.

Evitan movimientos del eje en cualquier sentido que puedan dañar la carcaza por la fricción.

**Los Sellos o Empaques:** Son utilizados para evitar fugas de fluido alrededor del eje. Generalmente son sellos mecánicos, los cuales tienen un anillo fijo y un anillo de rotación. Los anillos se encuentran fuertemente presionados alrededor del eje en la caja de prensaestopas.

La operación de estas bombas se basa como su nombre lo indica en la fuerza centrífuga, que es una fuerza que trata de mover objetos hacia fuera del centro de rotación. El impulsor, al rotar, genera esta fuerza y envía el fluido que se encuentra en sus paletas hacia fuera de su centro. Este movimiento tiene

dos efectos, el primero el fluido que se encuentra en las paletas del impulsor, es forzado hacia la pared de la carcasa que lo conduce a la descarga de la bomba; el segundo, crea una succión en el centro del impulsor, lo que hace que más fluido ingrese a sus paletas, para posteriormente ser bombeado.

El alineamiento del eje del motor y el eje de la bomba es crítico para su buena operación. Si no hay una buena alineación, se generará una vibración, lo que puede hacer que las balineras se gasten prematuramente, que sus partes internas se salgan de su balance, se generen fugas, ruptura de acoples y demás daños graves. En la figura 18 se puede apreciar la técnica láser utilizada para alinear ejes de bomba y motor, este método de alineación con tecnología láser, que se asimila al procedimiento de alineación de ejes paralelos con comparador. El proceso consta de montar dos sensores emisores y receptores a la vez en los ejes a alinear, que después de introducir las dimensiones necesarias para el cálculo de las correcciones, se realiza un barrido de  $180^\circ$  para poder obtener los valores residuales de desalineación y sus respectivas correcciones en ambos planos -horizontal y vertical, al mismo tiempo, luego se realizan los reportes de condición para cada conjunto donde se informa al líder de mantenimiento basado en condición para que se tomen decisiones de mantenimiento planificado, lo que trae beneficios y permite la detección de problemas que otro tipo de procedimientos hacen que sea de difícil detección o puedan pasar desapercibidos como la detección de pata coja y compensación por crecimiento térmico,



Figura 17. Alineación ejes motor/bomba. Fuente Hocol.

#### 2.8.12. Bombas de desplazamiento positivo.

Utilizadas cuando se trabaja con volúmenes bajos, o donde sean necesarias altas presiones. En el campo, podremos encontrar este tipo de bombas en trabajos de transferencia de productos desde tanques hacia tuberías como crudo por ejemplo, reinyección de agua a yacimientos, bombeo de glicol para procesos de deshidratación, lubricación de compresores, etc. Estas bombas ofrecen ventajas en trabajos con fluidos densos, calientes y vaporizantes y pueden entregar volúmenes medidos de líquidos.

Dentro de las bombas de desplazamiento positivo, se tienen básicamente dos tipos de bombas:

Las bombas recíprocas y las bombas rotatorias. Las bombas recíprocas o reciprocantes, incluyen las bombas de pistón, embolo y de diafragma, por lo tanto poseen pistones, émbolos y diafragmas que se mueven dentro de un cilindro hacia delante y atrás -movimiento recíproco. Son activadas por máquinas de combustión interna o por motores eléctricos. Poseen dos secciones, la de bombeo –fluid end, la cual se encarga de bombear el fluido y la sección accionadora –power end, la cual suministra la fuerza necesaria para operar. Si se desea bombear más fluido, se puede lograr, utilizando cilindros más grandes, agregando más cilindros o aumentando la velocidad de la bomba. Algunas veces bombas que

han sido programadas debidamente, pueden bombear en forma irregular, ocasionando niveles de vibración indeseados, Para estos casos se instala un amortiguador de vibración, que es un recipiente que contiene gas, el cual controla las variaciones fuertes de volumen de fluido, evitando dicha vibración. Las bombas con émbolos a diferencia de las de pistón, no ocupan toda el área de cilindro, lo cual es útil para el bombeo de fluidos a altas temperaturas o cuando el fluido bombeado hace que el pistón se pegue o que el cilindro se raye. Las bombas de diafragma, como su nombre lo indican, consta de un diafragma hecho de un material parecido al caucho, cubierto con un disco fino de metal donde se conecta a una biela. El diafragma se extiende a lo largo de la parte más ancha de cilindro de la bomba, separando una mitad del cilindro de la otra; debido a esto, este tipo de bombas son útiles para el bombeo de fluidos corrosivos o abrasivos. Las rotatorias, poseen engranajes, lóbulos, o rotores de rosca que rotan dentro de un cilindro para mover fluidos. Este tipo es ideal para aplicaciones con presiones de bajas a medias, presentan una presión de descarga más uniforme que las recíprocas y no necesitan mucho mantenimiento. Son utilizadas en la mayoría de sistemas hidráulicos, lubricación de compresores y balineras, bombeo de aceite de la máquina y en la inyección de químicos. Las de rosca se utilizan en transferencia debido a su gran capacidad, sin embargo, son muy costosas y pueden ser dañadas fácilmente con materiales abrasivos.

Las bombas de desplazamiento positivo poseen varias partes móviles y por tanto, su lubricación es continua. Muchas de sus partes son lubricadas por el mismo fluido que es bombeado; sin embargo otras partes requieren grasa o aceite, suministrados por procesos de lubricación como goteo y salpique, alimentación forzada, etc. Además de la lubricación, estas bombas también requieren ser enfriadas con aire o agua.

El mecanismo de funcionamiento consiste en que el fluido ingresa a una cámara, posteriormente es forzado por un pistón, émbolo u otro mecanismo a salir de ella, incrementándose la presión. Este punto es importante, puesto que en este tipo de bombas, al bloquearse la descarga o un punto aguas debajo de

ella, causará un incremento de presión, la cual puede romper la línea de descarga, generando lesiones a personas e incluso fatalidades, lo mismo que derrames de líquido bombeado -contaminación. Para evitar esto, este tipo de bombas deben tener siempre una válvula de alivio y una línea de desvío -by pass, localizadas a una distancia corta aguas abajo de la descarga de la bomba.

El siguiente diagrama figura 19, ayuda a la selección de la bomba adecuada para un sistema requerido.

#### 2.8.13. Compresores.

Un compresor es un mecanismo accionado por una fuerza motriz que sirve para elevar la presión de un gas sobre el cual actúa realizando un trabajo. Los compresores y las bombas son los impulsores de fluidos más importantes en una facilidad de producción de petróleo.

En términos generales, los compresores se clasifican de acuerdo a los gases que van a comprimir en:

- Compresores de aire.
- Compresores para gases diversos -Oxígeno, Nitrógeno, Hidrógeno, Helio, Acetileno, Etc.
- Compresores de frío –Refrigeración.

La buena operación de un compresor se mide por dos factores:

- El volumen
- La presión del aire expelido.

Debido a que el aire es más abundante y económico se suele comprimir más que cualquier otro gas.

Los compresores que suministran aire comprimido a presiones inferiores a 30 Psig, se conocen como ventiladores. En los compresores se realiza una prueba de estanqueidad con el equipo windrock, con esta técnica se pueden identificar que elementos están presentando falla y programarles su reemplazo para evitar paradas de planta por falta de aire comprimido para accionar los mecanismos y válvulas de control en la facilidad de producción de petróleo.

En los compresores se realiza la prueba de desempeño recíprocante, es una tecnología predictiva que diagnóstica la condición de los componentes internos de los equipos recíprocantes mediante técnicas

como el análisis de vibraciones, ultrasonido, temperatura, compresión en los cilindros y voltaje de ignición. Esta técnica es implementada para la medición de condición de maquinaria estática recíproca como compresores de gas, entre otros.

Los analizadores Windrock,<sup>9</sup> miden los datos dinámicos en la posición de marcha y luego se aplican los principios de la termodinámica y la ciencia para evaluar con precisión las condiciones y el desarrollo de las máquinas. El analizador portátil utiliza diversas tecnologías de sensores para recopilar datos de nivel a nivel con respecto al ángulo de la marcha. Los puntos de medida incluyen cilindro de presión, la vibración en el marco, de la cruceta y la ecografía del cilindro en las válvulas y los inyectores, movimiento de la barra de la proximidad y la velocidad angular del cigüeñal. El uso de leyes de los gases, las ecuaciones y los propietarios de diagnóstico del estado, los analizadores y software Windrock son capaces de evaluar la condición mecánica, el rendimiento y la rentabilidad económica de los compresores alternativos y motores.

Si se ha realizado más de una medición, se realiza una matriz de seguimiento de la condición diagnosticada en cada monitoreo para cada equipo.

## **2.9. Generadores.**

Los grupos rotativos consisten básicamente en un motor de corriente alterna, un alternador y una batería de condensadores.

Mediante la elección del número de polos y de la velocidad, el alternador, acoplado al motor, produce una corriente de una frecuencia determinada. Esta corriente es la que se aplica al inductor.

---

<sup>9</sup> RMS Group. Reliability Maintenance Services S.A.

## 2.10. Motores.

Un motor es una máquina que cambia una forma de energía en potencia -fuerza y movimiento. Así por ejemplo, la energía que lleva el combustible entra al motor y se transforma en movimiento. El cuerpo humano podría catalogarse como un motor, ya que transforma la energía contenida en los alimentos en fuerza y movimiento.

### a) Tipos de motores

En el siguiente cuadro se aprecian los tipos de motores más conocidos según la fuente de energía que utilizan. En la figura 19 se observan los diferentes tipos de motores.

Tabla 1.

*Tipos de motores.*

TIPO DE MOTOR	FUENTE DE ENERGÍA	OBSERVACIONES
Motor de combustión interna	Gasolina, Diesel, Fuel Oil, Kerosene, Gas, Crudo	Puede ser de 2 o 4 tiempos y tener 1 o varios cilindros, dispuestos en línea o en “V”. El pistón se mueve dentro del cilindro.
Eléctrico	Energía Eléctrica	Un rotor se mueve dentro de un estator.

Fuente: Hocol

### 2.10.1. Motor de combustión interna.

Este tipo de motor utiliza un combustible, lo encierra en un cilindro, lo enciende y con esto produce el movimiento del motor. Un motor está constituido por uno o varios cilindros, dentro de los cuales se realiza la explosión de la mezcla aire -gasolina que proporciona el carburador, y cuya enorme fuerza expansiva se convierte en energía mecánica. Dentro de cada cilindro se desplaza un pistón hacia arriba y hacia abajo, que por una biela se enlaza a una manivela o codo del cigüeñal, cuya rotación es la que se transmite a las ruedas. Cuando el pistón recibe por su parte alta la explosión de la mezcla aire/gasolina, se desplaza con fuerza hacia abajo y su movimiento rectilíneo se convierte por medio de la biela en un giro del cigüeñal. Recíprocamente, si este gira, el pistón enlazado por la biela tendrá que

moverse hacia arriba y hacia abajo del cilindro. En los costados superiores del cilindro existen dos conductos, uno de admisión por donde ingresa la mezcla y otro de escape para evacuarla al exterior cuando ya se ha quemado. Estos dos orificios se cierran y abren por medio de válvulas. El cilindro adicionalmente, viene con una bujía -motores a gasolina, la cual proporciona un chispa eléctrica que quema la mezcla gasolina/aire. Esta chispa salta en el momento conveniente.

Dentro de los cilindros, la distancia de recorrido del pistón desde el punto más bajo hasta el punto más alto, se conoce como carrera.

En un motor de 4 tiempos se llevan a cabo 4 etapas. La primera etapa -admisión, el pistón se encuentra en la parte más alta y empieza a descender; en este instante se abre la válvula de admisión y la mezcla es aspirada por el pistón que desciende y se va llenando el cilindro. La válvula de admisión se cierra cuando el pistón llega a la parte más baja del recorrido y el cigüeñal ha dado media vuelta. En la segunda etapa -compresión, el pistón sube desde la parte inferior y las dos válvulas -admisión y escape están cerradas, de esta manera, los gases que se encuentran en el cilindro, comienzan a comprimirse y por esta acción se calienta, lográndose así una mejor condición para la explosión que va a realizarse en la siguiente etapa. El cigüeñal ha dado otra media vuelta. En la tercera etapa o tiempo -explosión, estando los gases comprimidos, salta la chispa en la bujía que los inflama; la fuerza de la explosión lanza el pistón desde el punto más alto del cilindro hacia el punto más bajo ocasionando un fuerte impulso que se transmite por el pistón hacia la biela y esta a su vez hacia el cigüeñal y su volante. Durante la carrera del émbolo en la explosión, las dos válvulas han permanecido cerradas y el cigüeñal efectúa una tercera media vuelta. En el cuarto tiempo -escape, el pistón se encuentra en la parte más baja de su recorrido, la válvula de escape se abre y el pistón al subir, empieza a expulsar los gases quemados hacia el exterior por la tubería de escape. Al llegar el pistón al punto más alto, se cierra la válvula de escape. El cigüeñal ha girado otra media vuelta.

Luego se abre la válvula de admisión y se repiten todas las fases anteriores en la misma forma y en el mismo orden, mientras el motor está funcionando; el conjunto de las cuatro operaciones distintas - admisión, compresión, explosión y escape, se llama ciclo de cuatro tiempos. Como a cada tiempo del motor le corresponde media vuelta del cigüeñal, el ciclo se realiza en cuatro medias vueltas, o sea en dos vueltas completas del cigüeñal.

En el caso de motores Diesel, el funcionamiento es igual al anterior a excepción de que no usa bujías sino inyectores de combustible y este en lugar de encender por chispa, lo hace por alta temperatura lograda por la compresión.

La potencia del motor depende de la cantidad de mezcla que haga explosión en el cilindro. En lugar de hacer un solo cilindro, se pueden hacer varios más pequeños, lo que hará una marcha más regular.

#### 2.10.2. Motores eléctricos.

Este tipo de motor transforma la energía eléctrica en movimiento y fuerza. Sus partes son carcasa, rotor, embobinado, estator, conmutador, base, eje del rotor y soporte del cojinete. La energía eléctrica llega al conmutador -plaquitas de cobre, y de allí por los cables pasa al embobinado -cable enrollado, del motor. Simultáneamente está entrando energía eléctrica al estator. El estator va montado dentro de la carcasa fija y por lo tanto no se mueve. Cuando el estator y el rotor se encuentran energizados, se produce movimiento del rotor, es decir, del eje. De esta manera se ha transformado la energía eléctrica en fuerza y movimiento.

La lubricación de este tipo de motores, consiste en lubricar los cojinetes. Estos pueden ser rodamientos o cojinetes planos. Algunos rodamientos vienen sellados y no se hace necesaria su lubricación. La lubricación puede ser por aceite o por grasa, según el diseño del cojinete.

A los motores eléctricos se le realiza pruebas de desempeño estático y dinámico, esta tecnología predictiva que diagnóstica la condición de los motores eléctricos en seis -6, zonas de falla como son: calidad de energía, circuito de energía, aislamiento, estator, rotor y entrehierro; mediante una prueba

estática MCE -resistencia a tierra, capacitancia a tierra, resistencia fase a fase, inductancia fase a fase, índice de polarización, absorción eléctrica, voltaje a pasos y prueba de la influencia del rotor –RIC, y una dinámica EMAX -prueba de arranque, prueba de análisis de corriente, prueba de evaluación del rotor, prueba de excentricidad y prueba de potencia.<sup>10</sup>

Los entregables del mantenimiento realizado son los reportes de condición para cada equipo donde se informa el estado general del equipo y un análisis detallado de la condición de sus componentes apoyados por los espectros y gráficas que se generan para mostrar los eventos de falla identificados y las acciones de mitigación.

Si se ha realizado más de una medición, se entrega una matriz de seguimiento de la condición diagnosticada en cada monitoreo para cada equipo.

Todo esto trae consigo beneficios en el incremento de la disponibilidad y confiabilidad de los equipos rotativos eléctricos, reducción en los costos de mantenimiento generados por paradas no programadas debido a desgaste de los componentes ya que se tiene una detección temprana de las fallas, brindando una intervención planeada y oportuna para el mantenimiento.

Amplia visión del estado actual de los componentes eléctricos y magnéticos del sistema analizado.

### **2.11. Unidades automáticas de fiscalización y transferencia –LACT.**

La unidad -LACT sirve para la medición o aforo y transferencia automatizada de petróleo, condensados y gas natural e igualmente mide las calidades del producto transferido de vendedor a comprador. Este último puede recibir el producto por tuberías, camión cisterna o barco. El crudo vendido, será solo recibido por el comprador con pequeñas cantidades de impurezas, las cuales pueden ser agua y sedimentos básicos como arcilla, arena, etc., que es lo que conocemos como BS&W.

Como se mencionó la rentabilidad del crudo se basa en el volumen y su gravedad API. El volumen base es el conocido como “Barril”, el cual equivale a 42 galones -0.16 m<sup>3</sup> aprox. Este volumen cambia

---

<sup>10</sup> Norma ISO17359, Condition monitoring and diagnostics of machines –general guidelines, 2003.

de acuerdo a las condiciones de temperatura; por esta razón, las mediciones se llevan o convierten a una temperatura establecida de 60°F (15.5°C o 289°R). Esta corrección del volumen por temperatura, también debe realizarse a la gravedad API; que es una unidad que mide la calidad del crudo -a mayor °API mejor precio por barril de crudo.

Una Unidad LACT transporta el petróleo tratado y almacenado en los tanques, detecta directamente el exceso de sedimentos básicos y agua, la gravedad API, mide el volumen, lo corrige a 60°F y lo transfiere, todo esto de manera automática.

Con el uso de Unidades LACT, se obtienen las siguientes ventajas:

- Mejora la medición de crudo eliminando errores comunes en los aforos y pruebas.
- Incrementa la rentabilidad, ya que cuanto menos tiempo permanece el crudo en los tanques, mayor es su volumen y su gravedad API es más alta.
- Disminuye costos debido a la necesidad de un número menor de tanques en la facilidad.
- Reduce el trabajo del personal en lo referente a papeleo, operación de bombas, etc.
- Reduce riesgos de derrames.
- Se incrementa la automatización al tener la posibilidad de operar las 24 horas del día.

Las unidades LACT están montadas generalmente sobre patines y se instalan en grupo en las plantas de campo, ver figura 19. La complejidad y distribución de los dispositivos puede variar. Un ejemplo típico contiene:

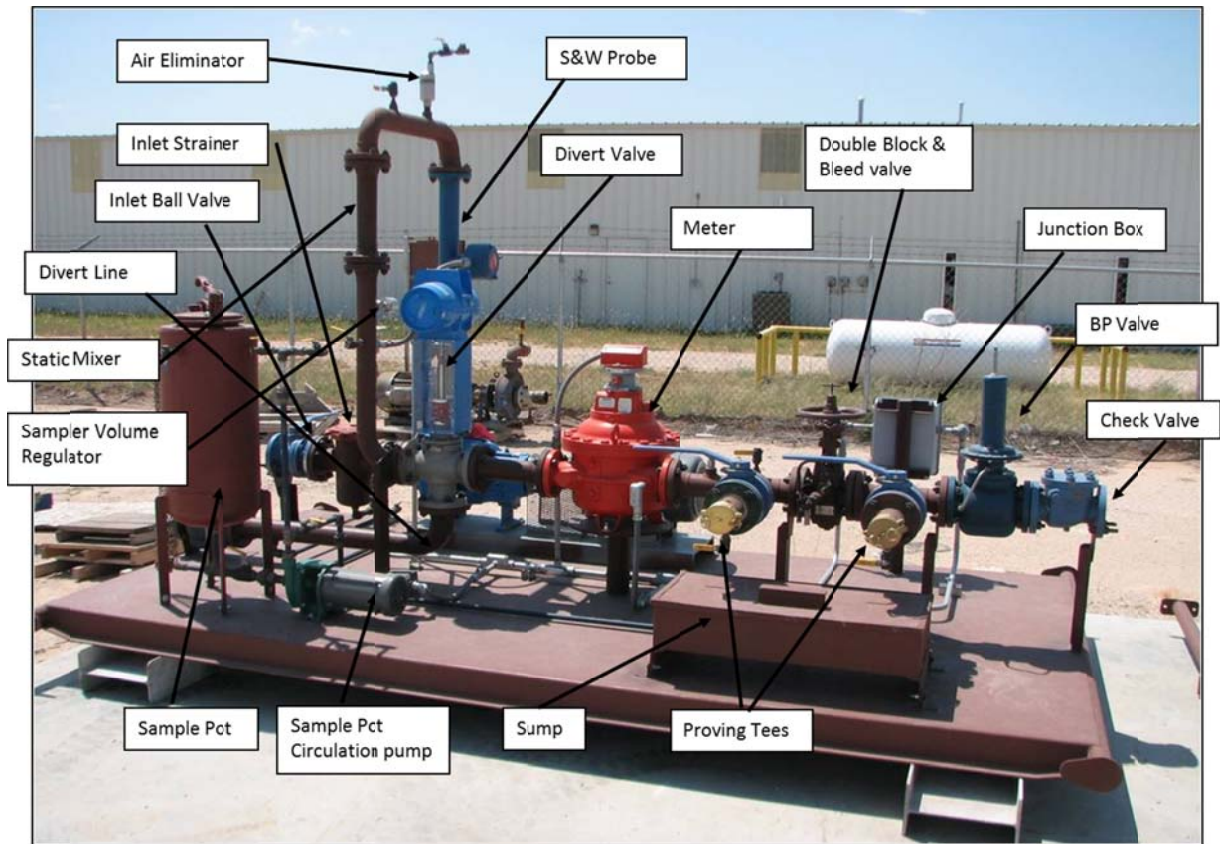


Figura 18. Unidad LACT. Fuente: Cameron

**Bomba:** Para conducir el petróleo del tanque a través de la unidad y finalmente hacia el oleoducto.

Puede ser centrífuga o de desplazamiento positivo, siendo más comunes las primeras, debido a que vibran menos y logran un flujo más uniforme para la prueba del medidor. Su operación se lleva a cabo desde el tablero de control, pueden programarse su encendido y apagado automático después de un volumen determinado de fluido desplazado o puede hacerse manualmente.

**Filtro:** Elimina partículas sólidas tales como costras de la tubería, esquirlas de soldadura, arena, etc., las cuales pueden causar muestreos y aforos inexactos. Cuando se trabaja con bombas centrífugas, el filtro se instala aguas debajo de ellas. En el caso de bombas de desplazamiento positivo, la instalación se hace en la bomba.

**Desaireador:** Es un dispositivo que elimina el gas o el aire del petróleo. Algunas veces este y el filtro conforman un solo dispositivo. El gas libre o el aire pueden causar cavitación en la bomba, hacer que

el medidor patine o que se tome una muestra no representativa. En este dispositivo se acumula petróleo, lo cual permite una separación de gas y aire. Después de que se ha acumulado cierto volumen de gas, una válvula que opera con un flotador, se abre y permite su salida hacia una línea de ventilación.

Sonda de BS&W: Detecta impurezas -sedimentos y agua.

Monitor de BS&W: Dispositivo de control que interpreta las señales de la sonda y envía señales a la válvula de derivación. Cuando el BS&W es mayor que lo permitido o programado, el monitor interrumpe la entrega y automáticamente dirige el flujo de petróleo a la planta purificadora.

Sonda de Muestreo: Dispositivo que toma muestras de petróleo para determinar el BS&W y °API.

Receptáculo de Muestras: Colecta y almacena las muestra tomadas por la sonda. Compradores y vendedores tomas muestras de este recipiente.

Válvula de Derivación: Es una válvula de 3 vías que permite el paso del fluido hacia el sistema de tratamiento o hacia el medidor. Opera de acuerdo a las señales recibidas desde el monitor. La operación de desvío de fluido hacia el tratamiento en caso de que no cumpla los requerimientos programados, se programa con un retraso de 30 segundos para que una pequeña cantidad de sedimentos básicos y agua no active la válvula. Una vez el BS&W vuelve a los valores permitidos, la válvula cambia automáticamente el flujo hacia el medidor para su distribución.

Medidor: Dispositivo de buena exactitud y repetibilidad que mide el volumen de petróleo que se está transfiriendo.

### **3. Implementación de mantenimiento predictivo en equipos de superficie.**

El análisis del modelo seguido de implementación de mantenimiento predictivo como un proceso importante dentro de la cadena de valor de los activos de la empresa, se basa en gran parte en lo dictado por la norma ISO17359, Condition monitoring and diagnostics of machines –general guidelines, 2003, que se muestra en la figura 20.

Las tecnologías no intrusivas utilizadas en el monitoreo de condiciones y el diagnóstico de fallas incluyen vibración, termografía infrarroja, análisis de desechos de aceite y desgaste, análisis acústico y ultrasónico y análisis de corriente eléctrica.

Aquellos en la industria manufacturera que han aplicado diligentemente y consistentemente estas técnicas han experimentado un retorno de la inversión que excede sus expectativas. Sin embargo, la eficacia de estos programas depende de las capacidades de las personas que realizan las mediciones y analizan los datos.

Se ha desarrollado un programa, especificado en esta parte de ISO 18436, para capacitar y evaluar la competencia del personal cuyas funciones requieran los conocimientos teóricos y prácticos apropiados y la experiencia pertinente en VA para el monitoreo y diagnóstico de condiciones de maquinaria.

Esta parte de la norma ISO 18436 define los requisitos con respecto a los cuales se debe evaluar el personal asociado con la medición y análisis de vibraciones para el monitoreo y diagnóstico de condiciones de maquinaria y los métodos de evaluación de dicho personal. Los solicitantes deben ser conscientes de que los empleadores y los clientes es probable que tengan la mayor confianza en los analistas de vibración certificada por organismos acreditados. Alternativamente, los solicitantes pueden optar por obtener el reconocimiento de otros organismos de evaluación de las partes que pueden proporcionar el siguiente nivel de confianza. Por último, los solicitantes pueden basarse en su propia autoevaluación y declaración de competencia, pero al hacerlo deben tener en cuenta que es probable que los empleadores y los clientes tengan la menor confianza en esta opción.

Este procedimiento al ser bien aplicado manteniendo el flujograma estipulado en la norma permite lo siguiente:

### 3.1. Revisión de los equipos.

**Identificación de equipos:**<sup>11</sup> Listar e identificar de forma clara todos los equipos y fuentes de alimentación y control asociadas, crear árbol de equipos según norma ISO14224.<sup>12</sup>

**Identificación de la función del equipo:** En este ítem se pregunta qué es lo que el equipo debe hacer y cuáles son las condiciones operacionales.

### 3.2. Revisión de criticidad y confiabilidad.

Mediante este análisis de criticidad se permite establecer jerarquías de equipos de acuerdo con su impacto en el negocio, la planta, línea o equipo, ella se aplica principalmente a: -instalaciones, - sistemas, -equipos, -componentes.

La criticidad se obtiene del producto de la frecuencia de fallas o su probabilidad y la consecuencia o severidad de su ocurrencia, esta última teniendo en cuenta elementos como afectaciones sobre población, daños al personal, impacto ambiental, pérdida de producción, costos de mantenimiento, pérdida de imagen y daños en la instalación entre otros.

Este análisis apoya la toma de decisiones para administrar esfuerzos y los recursos hacia donde más se requieren, en este sentido se tiene en cuenta lo siguiente:

**Diagramas de bloque de confiabilidad:** Se recomienda usar estos diagramas junto a los de disponibilidad y mantenibilidad, para mejorar el objetivo del monitoreo a condición el cual es parte del modelo predictivo.

**Establecer los equipos críticos:** Es recomendable realizar una evaluación de los equipos críticos con el fin de crear una lista donde se prioricen los equipos que harán parte o no del monitoreo a condición. Dentro de los equipos críticos se tienen los compresores de gas, los compresores de aire y

---

<sup>11</sup> Explicación del flujograma ISO17359, Conditiong monitoring and diagnostic of machines. –general guidelines, 2003

<sup>12</sup> ISO14224. Norma para la clasificación de equipos.

las bombas de transferencia, dado que si estos equipos presentan fallas funcionales, impactan en la producción y la seguridad del proceso.

Para ello se aplica la metodología de nivel de ponderación del riesgo -NPR, esta técnica aporta al staff de mantenimiento y producción el poder tener una apreciación del impacto de los equipos en la seguridad de las personas, el medio ambiente, la producción y la imagen de la empresa; lo que se evita con un mantenimiento centrado en confiabilidad y realizando las tareas predictivas que el estudio defina.

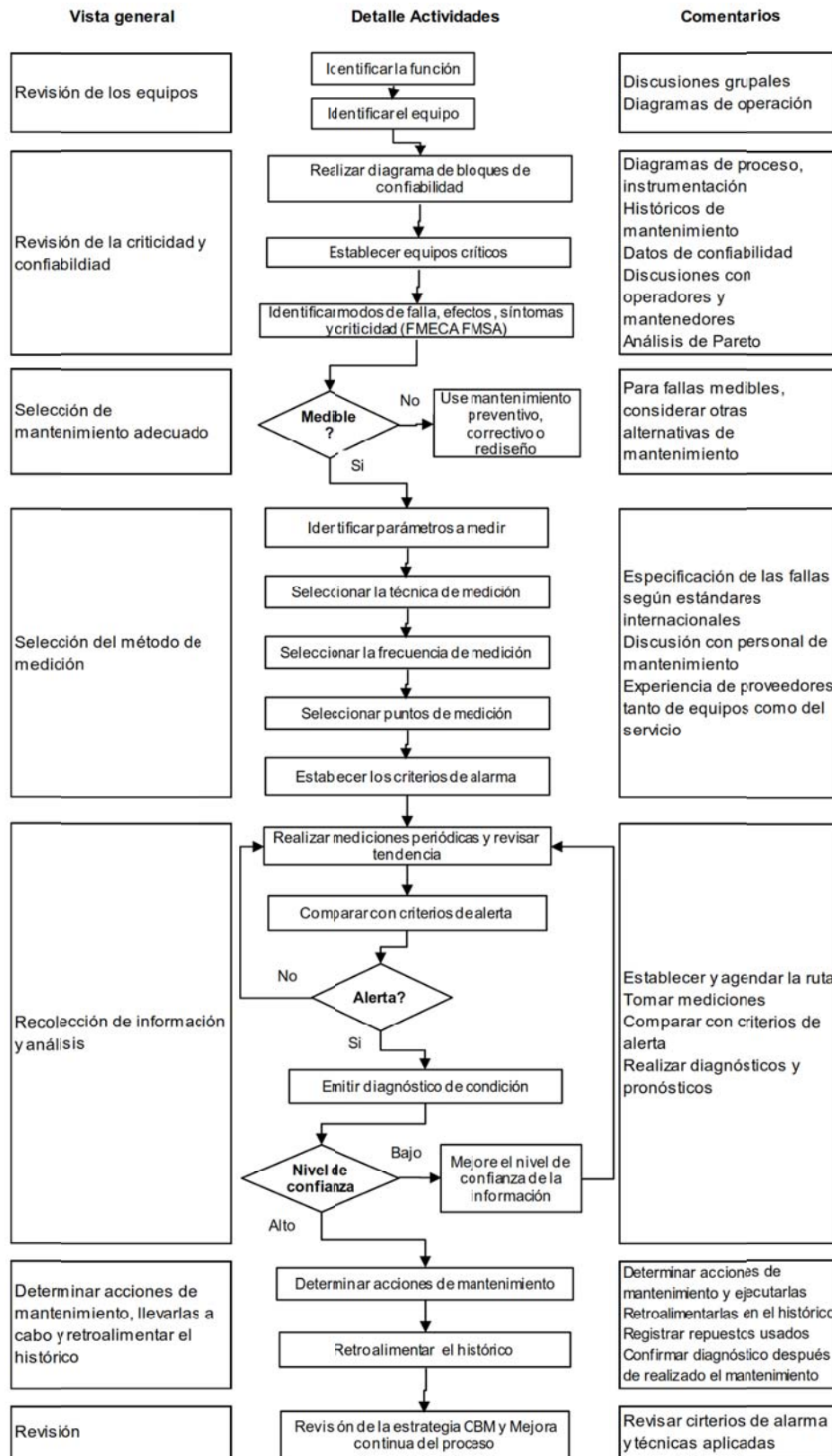


Figura 19. Flujograma del mantenimiento predictivo. Fuente ISO

**Identificar modos de falla:** Es recomendable realizar los estudios Análisis de Modos de Falla y Efectos, -FMEA/FMECA, para generar información sobre la gama de parámetros que se deben medir y monitorear para evitar las fallas potenciales donde se indican las condiciones que se presentan antes del daño ya sea por el aumento y/o disminución en un valor medido o ya sea por algún otro cambio en una característica.<sup>13</sup>

Cada falla que se presente en una facilidad de producción de petróleo, representa un riesgo potencial, por lo cual es esencial entender cómo se presenta, entendiendo la forma en que los equipos fallan, podremos diseñar mejores acciones correctivas o preventivas. En este caso, las acciones son tareas de mantenimiento. Estas acciones, son derivadas del proceso de análisis de modos de falla, de tal manera que a cada modo de falla le corresponde una tarea. Podemos definir entonces un modo de falla, como “la forma” en que un equipo o activo presenta falla.

Es importante para el entendimiento de la falla, poder identificar que existen dos tipos diferentes que se pueden presentar -“fault” y “failure”; primeramente, aquel estado de falla, en el cual un activo simplemente deja de funcionar y otro, en el cual el activo no desempeña su función conforme a un estándar de desempeño deseado, conforme a las necesidades que el usuario tiene, pero no necesariamente deja de funcionar. Esta última condición, es la que más nos interesa estudiar y la denominamos “falla funcional”.<sup>14</sup>

**Selección del mantenimiento adecuado:** Si después de realizado el FMEA/FMECA el modo de fallo arrojado no tiene síntomas medibles mediante alguna técnica CBM –Mantenimiento Basado en Condición, hay que aplicar estrategias alternativas de mantenimiento como lo son correctivo, preventivo y/o modificación –diseño.

---

<sup>13</sup> Jonh Moubray.

<sup>14</sup> FMEA. John Moubray.

### 3.3. Selección de la técnica de medición:

**Identificación de los parámetros a medir:** Después de realizado el FMEA/FMECA sale una información para ser usada en la identificación de los parámetros a medir y monitorear, según las consecuencias que sus variaciones presenten. El listado de estos parámetros en general se aprecia en la figura 21.

**Seleccionar las técnicas de medición:** Las técnicas de medición se pueden implementar de forma local con -dispositivos y mecanismos instalados en él equipo, de forma remota, de forma semi-permanentes, con el equipo en línea o fuera de línea. Así mismos se debe definir la precisión con se desea medir los parámetros y en esto hay que tener en cuenta que no van a ser tan exactos como una metrología puntual, pero aquí lo que realmente importa es la tendencia a medir de la muestra.

Luego de escogida la técnica de medición a implementar, hay que definir de qué forma el recurso técnico –RRHH, va a realizarla dentro de las cuales se tiene:

**Ejecución interna:** El programa es manejado totalmente por el personal de la organización, donde se incluye la recolección, interpretación y análisis de los datos y las recomendaciones que surjan posterior a este proceso.

**Ejecución contratada:** Una empresa de servicios de PdM –mantenimiento predictivo, será contratada para la ejecución del programa.

**Ejecución híbrida:** El programa es ejecutado una parte por el personal interno de la organización y otra parte será subcontratada con empresa externa.

**Seleccionar la frecuencia de medición:** Dependiendo del tipo de falla que haya salido del estudio FMEA/FMECA, se debe considerar si el muestreo debe hacerse continuo o periódico, pero está influenciada por factores tales como ciclos de trabajo, lo recomendado por fábrica, el costo y la criticidad del equipo.

**Seleccionar puntos de medición:** La decisión de implementar los puntos de medición será posible de acuerdo con su viabilidad, ya que se debe tener presente lo económico, si el montaje permite tomar las muestras de forma adecuada y/o se requieren de permisos especiales para hacerlo.

**Establecer los criterios de alarma:** Los rangos de los valores pueden ser únicos o múltiples niveles, tanto creciente como decreciente o cambios que ocurren dentro los límites previamente establecidos de alerta, mientras que no se excedan esos límites. Así mismo se deben establecer criterios para dar la indicación más temprana posible de la ocurrencia de una falla. Antes de iniciar la implementación se debe establecer la línea base de medición, esto debido a que es mejor definir con precisión la condición inicial del equipo.

#### **3.4. Recolección y análisis de la información:**

**Realizar mediciones y revisar su tendencia:** El procedimiento general para la recopilación de datos es tomar medidas y compararlas con las tendencias históricas, bases de datos o de representantes de máquinas iguales o similares. Las mediciones se toman a lo largo de una ruta programada con cierta periodicidad.

**Comparación con criterios de alerta:** Si los valores medidos son aceptables en comparación con los criterios de alerta/alarma, pero si los valores medidos no son aceptables, debe hacerse un diagnóstico. Puede darse el caso de hacer una evaluación de la condición, así no haya signos de alarma, pero se prevé una falla a futuro, esto es lo que se considera pronóstico.

**Mejorar el nivel de confianza de la información:** Hay que asegurarse de que los datos de la tendencia a los cuales se le hace seguimiento sean confiables, de no ser así se debe proceder a mejorarlos, retomando datos de nuevo, modificando la frecuencia de monitoreo o realizar otra toma de datos adicional, también se puede comparar con otros datos históricos, usar otra técnica más especializada o cambiar de proveedor, serían algunas vías para mejorar esta labor.

### **3.5. Determinar que tareas de mantenimiento se van a implementar y hacer la retroalimentación respectiva.**

Con base a los análisis realizados salen los siguientes aspectos:

**Determinar acciones de mantenimiento:** Por lo general estas acciones de mantenimiento dependen de la confianza en el diagnóstico o en el pronóstico, pero sin importar lo anterior, se recomienda al menos inspeccionar o generar el mantenimiento correctivo antes de que la falla sea grave.

**Retroalimentarse de los históricos:** Tanto las rondas del mantenimiento predictivo como las acciones a tomar de acuerdo con los diagnósticos, deben quedar registradas en el CMMS –software para la gestión del mantenimiento, de la compañía. Cuando las tareas de mantenimiento correctivo producto del predictivo han sido ejecutadas, es necesario documentarlas y compararlas con el diagnóstico inicial y mejorarla de ser el caso.

**Revisión:** El mantenimiento en general es un proceso de mejoramiento continuo, muchas veces algunas técnicas no son tenidas en cuenta desde el inicio por múltiples criterios o también estos criterios suelen ser distantes de las condiciones y necesidades reales del equipo y del mismo recurso o talento humano que estén dirigiendo las acciones. Es recomendable que después de haber iniciado la ejecución de las rondas predictivas, se evalúen todas las variables que permitan optimizar la efectividad del proceso.

Una de la formas para medir la efectividad del proceso y el estado de la implementación es a través de indicadores con los cuales se puede conocer la brecha que existe entre lo que se da y lo que se espera, realizando el análisis que permite cerrar esta brecha. El principal reto que enfrenta cualquier profesional con su saber es poder partir de lo que la realidad le permite o le presenta para a partir de ello concebir un estado diferente de la situación y con su conocimiento posibilitar nuevas formas que

transformen esa realidad problémica, pudiendo de esta manera plasmar la praxis de su saber. -concepto de proyecto desde la praxis.<sup>15</sup>

#### **4. Condiciones básicas para asegurar la implementación del mantenimiento predictivo a equipos de superficie en facilidades de producción de petróleo.**

Teniendo clara las condiciones mínimas en la empresa, las personas y la operación en general, se observa que implementar el mantenimiento predictivo a corto plazo sale un poco oneroso,<sup>16</sup> para esto la alta dirección deben ser consiente del paso que se va a dar y que se conozca de primera mano el valor total de la inversión, con eso se tiene la seguridad de implementarlo y se evitan reprocesos y malestares.

La implementación del mantenimiento predictivo implica un cambio cultural, nuevas funciones, nuevos roles y para esto se debe socializar con todo el personal que está involucrado en el mantenimiento actual y los que llegan a desarrollar esta estrategia de mantenimiento para que entre todos se construya el desarrollo de las frecuencias y planes de mantenimiento acorde con lo recomendado en el estudio de factibilidad realizado con anterioridad.

La persona líder de mantenimiento debe generar confianza a todos los interesados, ya que la gran mayoría son y están escépticos de esta nueva estrategia de mantenimiento y de lograr buenos resultados, estos avalarán la bondad del proceso. La actuación de un líder adecuado de mantenimiento y confiabilidad debe denotarse sobre su equipo de trabajo, sin sofocarlo; siendo algunas de sus competencias y atributos la inteligencia, carácter, abnegación, subordinación, entusiasmo, poder de comunicación y comprensión. Esto debe ser acompañado de una apariencia física agradable, que transmita entre otros, capacidad de equilibrio interior, lo que ayudará a mantener la confianza de sus compañeros y colaboradores. Su desarrollo personal y aplicación de hábitos positivos, hacen que el

---

<sup>15</sup> Lev Semionovitch Vygotski (1836-1934),

<sup>16</sup> John Moubray.

equipo de trabajo le siga por convicción y empatía y no por imposición u obligación, aspecto que potencia cada vez más al grupo a convertirse en equipo auto dirigido, elementos que aportarán a los resultados organizacionales.<sup>17</sup>

Los interesados se capacitan fuertemente en las técnicas predictivas y luego ellos mismos darán aportes valiosos al proceso, ya que son los que están directamente involucrados en la confiabilidad, disponibilidad y seguridad de los equipos de superficie.

Un elemento fundamental y de gran ayuda en la implementación del mantenimiento predictivo, es la de llevar y cargar toda la información en el software destinado para la gestión del mantenimiento, allí queda consignada toda información de órdenes de trabajo, hallazgos, tiempos de ejecución, recurso técnico, recurso equipo, entre otros.

Todo lo realizado en torno a la implementación y desarrollo del mantenimiento predictivo debe quedar documentado y esta información debe usarse para futuros análisis de casos que se presenten y actualizar el modelo preventivo planteado, ya que se hace notable que el proceso en sus inicios no será el 100% efectivo esperado.

Durante las etapas de implementación se obtiene la participación del personal staff -ing. de confiabilidad, planeador, programador, supervisor y del personal operativo de la compañía \_técnicos mecánicos, eléctrico, de instrumentación y comunicaciones, y entre todos se decidió el arranque de la implementación.

Con la información obtenida de los equipos en los cuales se aplicaría el mantenimiento predictivo, se definió un árbol de equipos críticos inicialmente, entre los cuales se seleccionaron los compresores de gas, las bombas de transferencia de crudo, bombas de transferencia de agua y compresores de aire para arranque de motores de combustión interna y aire para instrumentos.

Las técnicas predictivas definidas para aplicarlas a los equipos descritos fueron las siguientes:

---

<sup>17</sup> ACIEM.

- Análisis y monitoreo de vibraciones.
- Análisis de lubricantes.
- Monitoreo de desempeño de compresores de gas –windrock.
- Ultrasonido.
- Diagnóstico de válvulas.
- Termografía infrarroja.
- Inspecciones visuales.
- Resistencia de aislamiento de bobinado en motores eléctricos.
- Análisis de corrientes de motores eléctricos.

Se inicia en firme la implementación del modelo de mantenimiento predictivo a los equipos de superficie en una facilidad de producción de petróleo, lo que ha conllevado a un incremento en la confiabilidad y disponibilidad de los activos.

## 5. Conclusiones.

\*Con la implementación del modelo de mantenimiento predictivo se evidencia que mejora disponibilidad mecánica del 97%, ya que las fallas potenciales en la red eléctrica pudieron ser detectadas a tiempo mediante la técnica predictiva de termografía, los compresores de gas aumentaron su confiabilidad y apporto al 97%, también se logró un aumento significativo de la producción de petróleo, ya que con más equipos disponibles más tratamiento y bombeo se logró este aumento en la producción.

\*El indicador de mantenimiento proactivo -vs. el reactivo, se estabiliza en 80/20, cuya relación se considera óptima para el mantenimiento de un sistema de gestión de mantenimiento y activos.

\*Los resultados se hacen notorios y la confianza y madurez de la gestión del mantenimiento enmarcan un ahorro progresivo de dinero ya que los gastos son controlados de manera eficiente.

\*La disponibilidad en los equipos se obtiene a partir de los correctivos que fueron identificados por el predictivo, yendo de la mano con la disminución de los tiempos de mantenimiento.

\*Los trabajos se realizan con permisos, órdenes y procedimientos de trabajo seguro.

\*El éxito de la implementación impacta el clima laboral en el departamento de mantenimiento y con la dedicación de la persona encargada al 100% se posibilita tener retroalimentación de primera mano y constante apoyo de todas las demás áreas.

\*Como reflexión se espera que la industria en Colombia además de la petroquímica se dé a la tarea de investigar más acerca de esta técnica y se adapten a nuevos cambios.

## Referencias.

Project Management Institut, I. (2013). *Guía de los fundamentos para la dirección de Proyectos (guía del PMBOK) 5a. Edición*. Newton Square, Pensilvania EE. UU.: PMI Book Service .

ANDERSON David R. SWEENEY Denis J. WILLIAMS Thomas A. *Métodos cuantitativos para los negocios*. Thomson Editores. México D.F. 1999.

- ARENAS REINA José Manuel. Control de tiempos y productividad. International Thomson Editores Spain Paraninfo, S.A. Madrid. 2000.
- ARGÜELLES PABÓN Denise Caroline, NAGLES GARCÍA Nofal. Estrategias para promover procesos de aprendizaje autónomo. Editorial EAN. Bogotá D.C. 2002.
- BARBA Enric. Ingeniería Concurrente. Guía para su implantación en la empresa. Diagnóstico y evaluación. Gestión 2000. Barcelona. 2000.
- BERENSON Mark L. LEVINE David M. KREHBIEL Timothy C. Estadística para administración. Editorial Pearson educación. México. 2001.
- CHASE Richard B. AQUILANO Nicholas J. JACOBS F. Robert. Administración de producción y operaciones. Editorial Mc Graw Hill. Santa Fe de Bogotá. 2000.
- CHRISTOPHER, Martin. Logística. Aspectos estratégicos. México D.F: Limusa Noriega Editores. 2002.
- CONTRERAS. Marco Elías. Formulación y evaluación de proyectos. UNAD. Bogotá D.C. 1998.
- CUATRECASAS Lluís. Gestión competitiva de stocks y procesos de producción. Gestión 2000. Barcelona. 1998.
- CUATRECASAS Lluís. TPM. Total Productive Maintenance. Hacia la competitividad a través de los equipos de producción. Gestión 2000. Barcelona. 2000.
- DAVIS Mark M. AQUILANO Nicholas J. CHASE Richard B. Fundamentos de dirección de operaciones. Editorial Mc Graw Hill. Madrid. 2001.
- DE LA SOTA VELASCO sergio, LÓPEZ RASO María José. Prevención de riesgos laborales. International Thomson Editores Spain Paraninfo, S.A. Madrid. 2001.
- DURAN HERAS Alfonso, GUTIÉRREZ CASAS Gil, SÁNCHEZ CHAPARRO Teresa. La logística y el comercio electrónico. Editorial Mc Graw Hill. Madrid. 2001.
- EPPEN, G.D; GOULD. F.J; SCHMIDT C.P. Investigación de operaciones en la ciencia administrativa. Prentice Hall Hispanoamericana. México D.F. 2002.
- EVANS James R. LINDSAY William M. Administración y control de la calidad. INTERNATIONAL THOMSON EDITORES. México D.F. 2000.
- FEA ugo. Competitividad es calidad total. Manual para salir de la crisis. Ediciones ALFAOMEGA. México D.F. 1995.
- FEIGENBAUM Armand V. Control total de la calidad. Editorial Grupo Cultural Patria. México D.F. 2000.

- GAITHER, Norman, GFRAZIER, Greg. Administración de producción y operaciones. México: International Thomson. México D.F. 2000.
- GALLOWAY Dianne. Mejora continua de procesos. Ediciones gestión 2000. Barcelona. 1998.
- GRIMALDI John V. SIMONDS Rollin S. La seguridad Industrial. Su administración. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR. México D.F. 1996.
- GUTIÉRREZ CASAS, Gil. PRIDA ROMERO Bernardo. Logística y distribución física. Madrid. Mc Graw Hill. 1998.
- HEIZER Jay, RENDER Barry. Operations Management. Prentice Hall Inc. New Jersey. 2000.
- HEIZER Jay, RENDER Barry. Principles of Operations Management. Prentice Hall Inc. New Jersey. 1999.
- JOHANSSON Henry J. MCHUGH Patrick, PENDLEBURY A. John, WHEELER William A. Reingeniería de proceso de negocios. LIMUSA NORIEGA Editores. México D.F. 2002.
- KRAJEWSKI, Lee J. RITZMAN, Larry P. Administración de Operaciones. Casos y Conceptos Contemporáneos. México D.F. Prentice Hall. 2000.
- LEON Orfelio. Tomar decisiones difíciles. Mc Graw Hill. Madrid. 2001.
- LERMA KIRCHNER Alejandro. Guía para el desarrollo de productos. Un enfoque global. Editorial ECAFSA THOMSON LEARNING. México D.F. 2001.
- LOCKYER, Keith. La producción industrial. Su administración. Editorial Alfaomega, Bogotá D.C. 1998.
- MORENO-LUZÓN María D. PERIS BONET Fernando J. GONZÁLEZ CRUZ Tomás. Gestión de la calidad y diseño de organizaciones. Editorial Prentice Hall. Madrid. 2001.
- NOORI, Hamid. Administración de la producción. Mc Graw Hill. Bogotá D.C. 1996.
- RODELLAR LISA Adolfo. Seguridad e higiene en el trabajo. Alfaomega Grupo Editor. Bogotá D.C. 1999.
- THIERAUF, Roberto. Toma de decisiones por medio de investigación de operaciones. Limusa Noriega Editores. México D.F. 1995.
- GONZALES JAIMES, Isnardo. Desarrollo de la investigación. Bucaramanga. Universidad industrial de Santander, 2008.

- GONZALES JAIMES, Isnardo. Evaluación de la investigación. Bucaramanga. Universidad industrial de Santander, 2008.
- GONZALES JAIMES, Isnardo. La investigación científica. Bucaramanga. Universidad industrial de Santander, 2007.
- GONZALES JAIMES, Isnardo. Monografía de la especialización. Bucaramanga. Universidad industrial de Santander, 2007.
- GONZALES, Carlos Ramón. Formación del ingeniero de mantenimiento. Bucaramanga: ediciones UIS, 1994.
- MALDONADO, Miguel Ángel. Las competencias, una opción de vida. Ecoe, Ediciones, 2003. Bogotá.
- MOBLEY, R. An introduction to predictive maintenance. Estados Unidos: Van Nostrand, 1990.
- PINILLA, Álvaro. Un marco de competencias para ingeniería (conferencia). Bogotá, 2005.
- QUEVEDO C, Ángel. Las competencias para la ingeniería una mirada global. En: Boletín de la Asociación Iberoamericana de Instituciones de Enseñanza de Ingeniería. vol. 2, No 3 (primer semestre 2005); p. 2
- RUEDA GOMEZ, Gonzalo. El mantenimiento industrial. Bogotá: Icontec, 1989.
- SALAZAR HERNANDES, Guadalupe. Definición de perfiles profesionales. En: revista de trabajo social UNAM-ENTS. N° 37 (enero, febrero y marzo de 1989); p. 2
- SANCHEZ, Guillermo. Caracterización profesional de ocho especialidades de la ingeniería. CNP. 2006. Bogotá.
- TOBON, Sergio. Formación basada en competencias. Ecoe Ediciones, 2004. Bogotá.6p.
- Gómez de León, F.C. Tecnología del Mantenimiento Industrial. Universidad de Murcia. 1998.
  - ASM Handbook. Failure analysis and prevention. ASM International. 1986.
  - Carter, A.D.S. Mechanical reliability. MacMillan Education Ltd. London. 1986

- Gasca-Hurtado, G., & Losada, B. M. (2013). Taxonomía de riesgos de outsourcing de software/Software outsourcing risk taxonomy. *Ingeniare : Revista Chilena De Ingenieria*, 21(1), 41-53. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/1367082674?accountid=48891>
- Serrano, S. C. (2016). La gestión de proyectos en la formación de los profesionales de la información: Análisis internacional de la materia en los estudios universitarios de información y Documentación/Project management at information professionals' education: International analysis in the library and information science curriculum. *Revista General De Información y Documentación*, 26(1), 25-42. doi:[http://dx.doi.org/10.5209/rev\\_RGID.2016.v26.n1.53046](http://dx.doi.org/10.5209/rev_RGID.2016.v26.n1.53046)
- Solarte-Pazos, L., & Luis, F. S. (2014). Gerencia de proyectos y estrategia organizacional: El modelo de madurez en gestion de proyectos CP3M? V5.0. *Innovar*, 24(52), 5-18. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/1677177554?accountid=48891>
- Poveda Bautista, R. (2006). Propuesta de una metodología de ayuda a la decisión para los procesos de dirección y gestión de proyectos (Order No. 3235071). Available from ABI/INFORM Global. (304911327). Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/304911327?accountid=48891>
- Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo/Proposal of a maintenance management model and its main support tools. *Ingeniare: Revista Chilena De Ingenieria*, 21(1), 125-138. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/1367082676?accountid=48891>