

**METODOLOGIA PARA PRIORIZAR LA EJECUCIÓN DE MANTENIMIENTOS  
PREVENTIVOS BASADOS EN CONFIABILIDAD PARA LOS EQUIPOS  
PRINCIPALES DE LA OPERACIÓN EQUION EN CASANARE.**

**RAUL ALBERTO CULMA  
IVÁN ELÍAS GAVIDIA SILVA  
EDGAR ALFREDO GORDILLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA  
2016**

**METODOLOGIA PARA PRIORIZAR LA EJECUCIÓN DE MANTENIMIENTOS  
PREVENTIVOS BASADOS EN CONFIABILIDAD PARA LOS EQUIPOS  
PRINCIPALES DE LA OPERACIÓN EQUION EN CASANARE.**

**RAUL ALBERTO CULMA  
IVÁN ELÍAS GAVIDIA SILVA  
EDGAR ALFREDO GORDILLO**

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

**Director: Rusbell Farfán  
Ingeniero Mecánico  
Magister en Administración de Empresas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA  
2016**



**ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO, TRABAJOS  
DE INVESTIGACION O TESIS Y AUTORIZACIÓN  
DE SU USO A FAVOR DE LA UIS**

Yo, **IVAN ELIAS GAVIDIA SILVA**, mayor de edad, vecino de Bucaramanga, identificado con la Cédula de Ciudadanía No. 74.814.450\_\_\_\_ de Yopal, actuando en nombre propio, en mi calidad de autor del trabajo de grado, del trabajo de investigación, o de la tesis denominada(o):

**METODOLOGIA PARA PRIORIZAR LA EJECUCIÓN DE MANTENIMIENTOS PREVENTIVOS BASADOS EN CONFIABILIDAD PARA LOS EQUIPOS PRINCIPALES DE LA OPERACIÓN EQUION EN CASANARE,**

hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (CD o DVD) y autorizo a LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento. **PARÁGRAFO:** La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato virtual, electrónico, digital, óptico, uso en red, Internet, extranet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

**EL AUTOR – ESTUDIANTE,** manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad sobre la misma. **PARÁGRAFO:** En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, **EL AUTOR / ESTUDIANTE,** asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Bucaramanga, a los cinco (5) días del mes de febrero de Dos Mil Dieciséis 2016

**EL AUTOR / ESTUDIANTE:**

(Firma) *Ivan Elias Gavidia Silva*

**Nombre: IVAN ELIAS GAVIDIA SILVA**

## **DEDICATORIA**

A mis maestros que a lo largo de mi vida han dejado enseñanzas y experiencias tan valiosas.

Alfredo Gordillo

A mi esposa Diana por su apoyo, a mis hijos Iván Alexander y Karol Natalia por su sacrificio, y a mis padres por hacer de mí la persona que soy.

Ivan Gavidia

A mis hijos Vivian Andrea y Carlos Eduardo por recordarme siempre el Norte y la razón de mi ser, a Dios y mis padres por el apoyo incondicional.

Raul Culma

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1 MARCO CONCEPTUAL.....	17
1.1 IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA .....	17
1.2 IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE .....	18
1.2.1 Ecopetrol S.A.....	18
1.2.2 Repsol.....	19
1.3 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	20
1.4 OPERACIÓN EQUION .....	22
1.5 DESCRIPCIÓN GENERAL PROCESO DE PRODUCCIÓN .....	24
1.6 ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO E INTEGRIDAD EQUION .....	31
1.6.1 Filosofía de Mantenimiento EQUION.....	31
1.7 ESTRATEGIA DE INTEGRIDAD EQUION .....	33
1.7.1 Equipment Specific Maintenance Plan (ESMP) .....	35
1.8 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	38
2 OBJETIVOS .....	39
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	39
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	39
3 MARCO TEÓRICO.....	40
3.1 FUNDAMENTOS DE MANTENIMIENTO. ....	40
3.2 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO .....	41
3.2.1 El concepto básico de mantenimiento predictivo (PdM).....	43
3.3 ESTRATEGIA CBM ESTRUCTURAS .....	44
3.3.1 Fatiga inducida por Vibración .....	45
3.3.2 Resolviendo el Problema.....	46
3.3.3 Ejemplos de Correcciones .....	47
3.4 INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD.....	49
3.4.1 Definiciones de Ingeniería de Confiabilidad: .....	49
3.4.2 Análisis Estadístico de Datos.....	49
3.4.3 Análisis De Pareto .....	51
3.4.4 Análisis RAMS.....	52

3.4.5	Análisis de Causa Raíz (RCA):.....	52
3.5	SEGURIDAD DE PROCESOS .....	53
3.5.1	Conceptos- Definiciones Seguridad de Proceso.....	53
3.5.2	Seguridad de Proceso vs Seguridad de las Personas .....	55
3.5.3	Diagrama de Barreras .....	55
4	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE PRIORIZACIÓN.....	57
4.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	57
4.2	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS FALLAS.....	57
4.2.1	Análisis tiempo entre fallas Confiabilidad (R).....	58
4.2.2	Análisis de disponibilidad (A).....	61
4.2.3	Análisis tiempo de reparación Mantenibilidad (M).....	62
4.3	ESTATUS DE CONDICIÓN DE LOS COMPONENTES CRÍTICOS .....	63
4.3.1	Estado de componentes DUPART.....	65
4.3.2	Análisis estadístico durabilidad de partes .....	67
4.4	METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL RIESGO.....	69
4.4.1	Cumplimiento de estrategia de mantenimiento .....	70
4.4.2	Evaluación de la condición .....	72
4.4.3	Desempeño en índices RAM .....	74
4.4.4	Impactos en producción.....	75
4.5	Matriz de Riesgo.....	77
4.5.1	La Matriz de Boston.....	77
4.5.2	Metodología de Implementación matriz de Boston <sup>TM</sup> .....	77
4.5.3	Matriz de Boston Maquinaria Reciprocante .....	78
5	RESULTADOS.....	79
6	CONCLUSIONES.....	81
	BIBLIOGRAFIA.....	82

## LISTADO DE FIGURAS

figura 1 línea de tiempo stork .....	17
figura 2 el petróleo en colombia.....	18
figura 3 repsol en el mundo .....	19
figura 4 operación equion en casanare.....	20
figura 5 panorámica cpf floreña .....	21
figura 6 panorámica cpf cusiana .....	21
figura 7 panorámica epf recetor .....	22
figura 8 ciclo de vida de las instalaciones casanare .....	22
figura 9 diagrama del proceso del crudo.....	25
figura 10 compresor de aire.....	25
figura 11 planta de fuel gas .....	25
figura 12 sistema contraincendio .....	26
figura 13 llegada de pozos.....	26
figura 14 slug catcher .....	26
figura 15 sistema de despacho.....	27
figura 16 separador bifásico .....	27
figura 17 turbocompresor media presión .....	27
figura 18 turbocompresor de alta presión .....	27
figura 19 moto compresor reciprocante de alta presión.....	28
figura 20 moto compresor reciprocante de inyección .....	28
figura 21 moto compresor boosting recetor .....	28
figura 22 moto compresor boosting floreña .....	29
figura 23 moto generador a gas floreña.....	29
figura 24 moto generador a gas recetor.....	29
figura 25 proceso de gestión de activos equion.....	33
figura 26 esquemas estrategia de integridad equion .....	34
figura 27 estrategia de manejo de integridad equipo rotativo .....	35
figura 28 esquema desarrollo esmp.....	37
figura 29 evolución prácticas de mantenimiento .....	41
figura 30 tecnología usada en mantenimiento predictivo.....	42
figura 31 aplicación de la tecnología en mantenimiento predictivo .....	43
figura 32 adaptación diagrama p-f pdm reciprocantes.....	44
figura 33 fatiga inducida por vibración .....	45
figura 34 causa de la fatiga.....	46
figura 35 tubería con air gap.....	46
figura 36 tubería en cantiléver .....	46
figura 37 piernas muertas .....	47
figura 38 tuberías sin soporte 1 .....	47
figura 39 corrección tuberías sin soporte 2.....	47
figura 40 corrección tuberías sin soporte 3.....	47
figura 41 el método de ingeniería. ....	50
figura 42 entendiendo la variabilidad .....	50
figura 43 inferencia estadística .....	51
figura 44 gráfico de pareto.....	51
figura 45 diagrama de bloques de confiabilidad (rbd).....	52
figura 46 el árbol lógico de falla .....	53
figura 47 incidente seguridad de proceso .....	54
figura 48 triángulos de la seguridad.....	55
figura 49 modelo ciclo de vida seguridad de proceso .....	56
figura 50 diagrama de barreras .....	56
figura 51 análisis exploratorio downtime equion .....	57
figura 52 análisis exploratorio tbf 23c01a .....	59
figura 53 comportamiento de la confiabilidad @ 720 hrs. ....	61
figura 54 distribución de la disponibilidad equipos principales.....	61
figura 55 análisis exploratorio dt 23c01a .....	62
figura 56 comportamiento de la mantenibilidad @ 2 hrs.....	63

figura 57 proceso dupart.....	64
figura 58 interacción pdm - dupart.....	65
figura 59 interacción pdm - dupart.....	66
figura 60 variación vida característica de los componentes.....	66
figura 61 análisis exploratorio emp 3ra 2"-mh.....	67
figura 62 análisis weibull empaquetaduras.....	67
figura 63 proceso metodología de priorización.....	69
figura 64 factor de criticidad.....	70
figura 65 factor de criticidad movh.....	71
figura 66 factor de criticidad top ovh.....	71
figura 67 factor de criticidad mantenimientos preventivos.....	71
figura 68 criterios puntaje condición.....	73
figura 69 confiabilidad sistemas en serie.....	73
figura 70 factor de criticidad pdm.....	74
figura 71 factor de criticidad índice ram.....	75
figura 72 análisis exploratorio pérdidas.....	75
figura 73 factor impacto.....	76
figura 74 matriz de boston maquinaria reciprocante.....	78
figura 75 optimización plan de mantenimiento.....	79
figura 76 comparativo pérdidas asociada a mantenimiento.....	80

## Listado de tablas.

tabla 1 descripción de equipos mayores operación equion en casanare.....	24
tabla 2 equipos principales operación equion en casanare .....	30
tabla 3 equipos atípicos .....	57
tabla 4 pruebas de bondad-de-ajuste (kolmogorov-smirnov) para mtbf 23c01a.....	59
tabla 5 pruebas de bondad-de-ajuste (kolmogorov-smirnov) para 23c01a dt.....	62
tabla 6 status de condición de los componentes críticos de la maquinaria.....	68
tabla 7 status de mantenimiento .....	72
tabla 8 status tipo de mantenimiento .....	72
tabla 9 status de condición .....	74
tabla 10 status ram .....	75
tabla 11 matriz de boston .....	77

## RESUMEN

**TITULO:** METODOLOGIA PARA PRIORIZAR LA EJECUCIÓN DE MANTENIMIENTOS PREVENTIVOS BASADOS EN CONFIABILIDAD PARA LOS EQUIPOS PRINCIPALES DE LA OPERACIÓN EQUION EN CASANARE.<sup>1</sup>

**AUTORES:**

IVÁN ELIAS GAVIDIA  
EDGAR ALFREDO GORDILLO  
RAUL ALBERTO CULMA<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** CBM, PdM, Probabilidad de falla, Estrategia de Mantenimiento, Mantenimiento Preventivo, Mantenimiento Correctivo, Mantenimiento por Condición, RCA Root Cause Análisis, intervalo de Mantenimiento, Prueba de Bondad de Ajuste.

**DESCRIPCIÓN:** En el presente documento se encuentra descrita una metodología propuesta para la implementación de una estrategia de mantenimiento basada en condición con el fin de realizar la priorización de la programación de mantenimientos apoyados en el estado actual de la condición de los equipos, su desempeño en cuanto a confiabilidad, el análisis de los modos de falla, sus impactos y desempeño de componentes.

Dicha metodología es desarrollada mediante el análisis de las fallas, análisis de modos y efectos, y análisis estadístico de la ocurrencia de dichas fallas. Para el análisis de la condición de los equipos se utilizan las diferentes técnicas de mantenimiento predictivo con que se cuenta en el campo.

Esta metodología es una poderosa herramienta encaminada a establecer los planes de mantenimiento optimizados, determinando la secuencia de máquinas que se deben solicitar a operaciones, su prioridad y especificando de manera exclusiva las tareas que se deben realizar con el fin de reducir los impactos por pérdidas de producción, reduciendo los tiempos de intervención de los equipos y mejorando la disponibilidad de la flota de equipos. Lo que cobra gran relevancia al momento de desarrollar esta monografía, las condiciones del mercado de hidrocarburos exigen a las organizaciones concentran sus esfuerzos en reducir al mínimo los costos de producción para mantener un nivel competitivo.

---

<sup>1</sup> Monografía

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Director: Rusbell Farfán.

## SUMMARY

TITLE: METHODOLOGY FOR PRIORITY THE EXECUTION OF PREVENTIVE MAINTENANCE BASED ON RELIABILITY FOR MAIN OPERATING EQUIPMENT IN EQUION CASANARE.<sup>3</sup>

AUTHORS:

IVAN ELIAS GAVIDIA  
EDGAR ALFREDO GORDILLO  
RAUL ALBERTO CULMA<sup>4</sup>

KEYWORDS: CBM, PdM, probability of failure, maintenance strategy, preventive maintenance, corrective maintenance, maintenance by condition, RCA Root Cause Analysis, maintenance interval, Goodness of Fit Test.

DESCRIPTION: in this document is described a methodology proposed to implement a maintenance strategy based on condition in order to make the prioritization of maintenance scheduling supported in the current health status of the equipment, its reliability performance, the analysis of failure modes, its impacts and performance of components.

This methodology is developed by analyzing fails, modes and effects analysis, and statistical analysis of the occurrence of such failures. For the analysis of the condition of the equipment different predictive maintenance techniques that account in the field as vibration analysis, oil analysis, infrared thermography, MCE are used.

This methodology is a powerful tool aimed at establishing optimized maintenance plans, determining the sequence of machines that should apply to operations team, priority and exclusively specifying the tasks to be performed in order to reduce the impact of losses production, reducing intervention time of equipment and improving the availability of equipment fleet. What becomes very relevant when developing this paper, the hydrocarbon market conditions requires that organizations to focus their efforts on minimizing production costs to maintain a competitive level.

---

<sup>3</sup> Monography

<sup>4</sup> Engineering School Physical-Machanical, Maintenance Management Specialization, Director: Rusbell Farfán

## INTRODUCCIÓN

En el marco de la economía moderna, el principal objetivo de las empresas es mantener los procesos productivos con una alta tasa de producción, alta disponibilidad de los activos, y reducción de los impactos causados por eventos imprevistos como fallas sorpresivas, mantenimiento correctivo no programado, pérdidas de eficiencia, interrupción de la producción por paradas a causa de fallas menores y otras situaciones no controladas.

Debido a la situación actual del mercado de los hidrocarburos se hace necesario trabajar fuertemente en la reducción de costos operativos, desarrollo de estrategias para el cumplimiento de los planes y programas de producción.

Para ello se hace necesario establecer una estrategia de mantenimiento que sea sostenible y alineada con los objetivos corporativos del negocio, que contribuya a la organización de mantenimiento a generar valor, reducir costos y minimizar los impactos en la producción, minimizar las intervenciones innecesarias que impliquen parada de procesos, reducir los costos de mantenimiento y aumentar la efectividad de los diagnósticos para que las intervenciones sean las necesarias para garantizar la continuidad operacional.

A lo largo de esta monografía se presenta una estrategia de mantenimiento que integra diferentes herramientas desarrolladas que contribuyen al logro de los objetivos corporativos tanto de la organización de mantenimiento como para su principal cliente que es el departamento de producción.

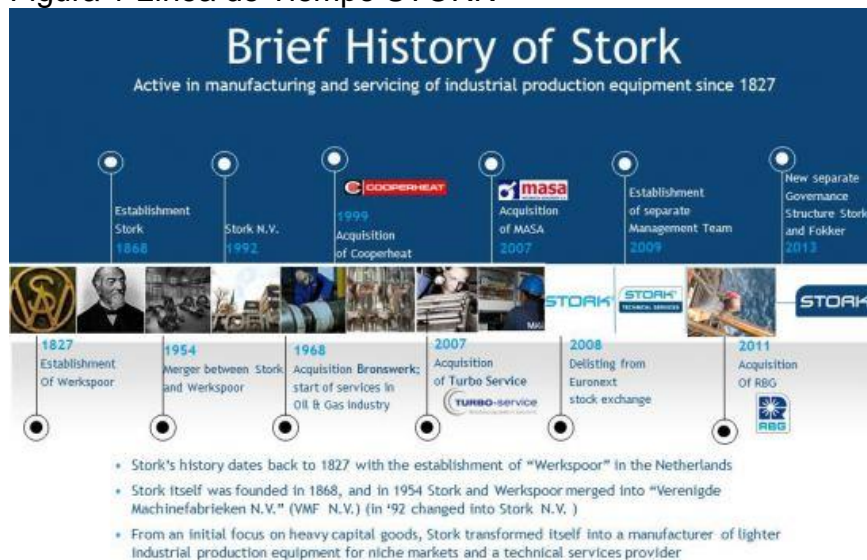
# 1 MARCO CONCEPTUAL

## 1.1 IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

STORK es una Empresa multinacional que se dedica a mejorar la integridad de activos para los clientes en todo el ciclo de vida de dichos activos. Para los clientes que operan en Oil & Gas, Químicos y Procesos, y las industrias de energía, el objetivo es “ONE partner for life” “Un compañero para la vida”. Es un equipo que entrega un nivel de servicio a nuestros clientes desde el concepto hasta la ejecución. Ofrece una amplia gama de soluciones integradas y servicios especializados en todas las áreas de gestión de activos y mantenimiento, siempre buscando reducir el riesgo, garantizar la seguridad y mejorar el desempeño ambiental.

Se puede rastrear los inicios de STORK a 1827 de la Nederlandse Fabriek van Werktuigen en Spoorwegmaterieel (obras de máquinas y equipos de trenes holandeses), en Colombia Stork adquirió a MASA (Mecánicos Asociados S.A.S) en el 2007. MASA nació en el año 1983 y desde entonces se ha consolidado como empresa líder en Colombia en la prestación de servicios en el sector energético (Oil & Gas, Minería, Energía, Industria y Petroquímica). Su liderazgo y competitividad la llevó a ser parte del grupo holandés de servicios industriales STORK.

Figura 1 Línea de Tiempo STORK



ASSET LIFECYCLE INTEGRITY PARTNER

Fuente: STORK

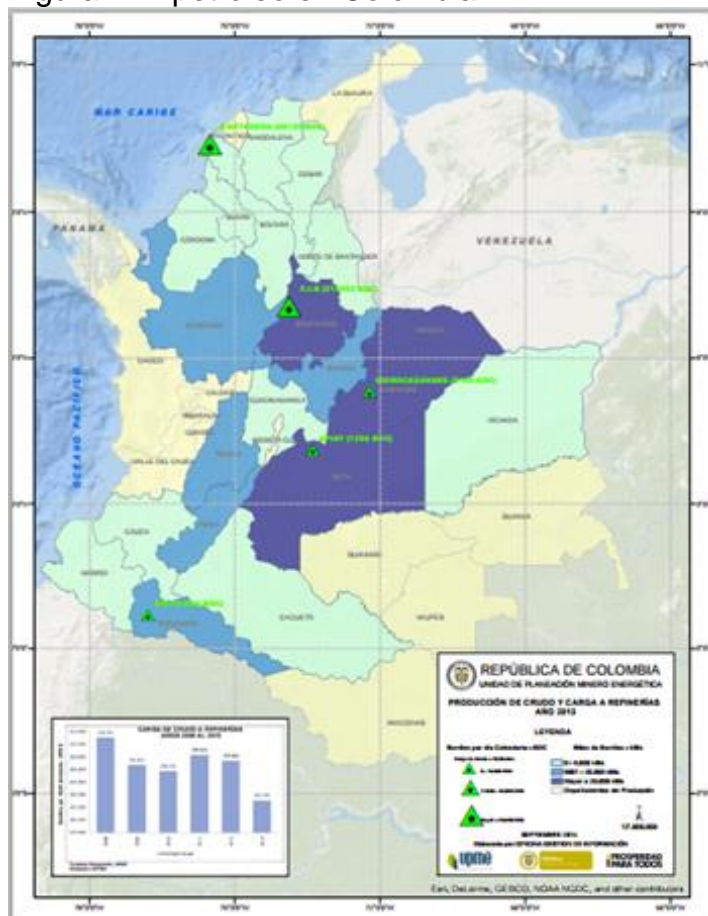
## 1.2 IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

EQUION ENERGIA LIMITED es la nueva marca de la sucursal establecida en Colombia por BP plc en 1986 (BP Exploration Company), cuyos accionistas son, a partir del 24 de enero de 2011, Ecopetrol S.A. (51%) y desde abril de 2015 Repsol (49%).

### 1.2.1 Ecopetrol S.A.

Por un lado, Ecopetrol es la empresa nacional de petróleos de Colombia. Antiguamente Empresa Colombiana de Petróleos S.A. Ecopetrol S.A. es la empresa más grande del país y la principal compañía petrolera en Colombia. Por su tamaño, Ecopetrol S.A. pertenece al grupo de las 39 petroleras más grandes del mundo y es una de las cinco principales de Latinoamérica. Ecopetrol tiene la participación mayoritaria de la infraestructura de transporte y refinación del país, posee el mayor conocimiento geológico de las diferentes cuencas.

Figura 2 El petróleo en Colombia



Fuente: Ecopetrol

## 1.2.2 Repsol

A su vez, Repsol es una Compañía energética integrada y global que desarrolla actividades de Upstream y Downstream en todo el mundo, Repsol ha fortalecido un equipo cualificado, diverso e ilusionado para afrontar el compromiso de garantía de suministro energético, apostando por la innovación tecnológica, la optimización de recursos, la eficiencia energética y la búsqueda de nuevas fuentes de energía sostenibles. Finalizando la compra de Talisman Energy, una operación que los convertirá en una de las empresas más importantes del sector energético mundial.

Figura 3 REPSOL en el Mundo

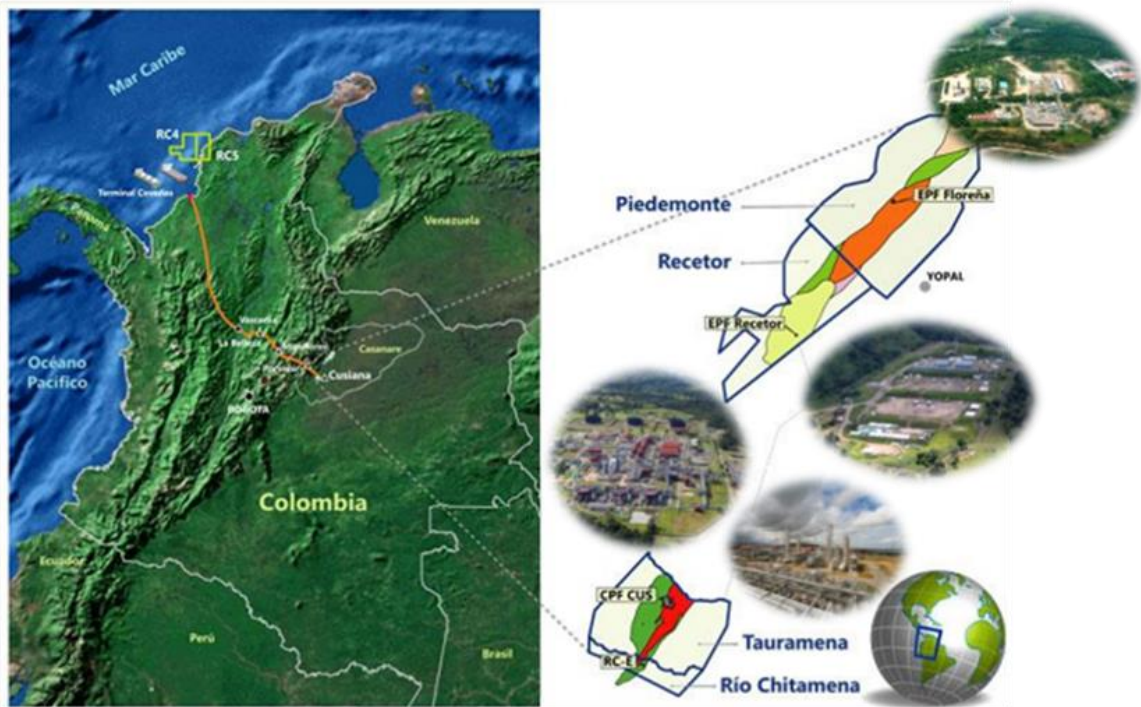


Fuente: REPSOL

### 1.3 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La presente monografía que contiene la Metodología de Priorización, se desarrolla para las Instalaciones donde EQUION desarrolla sus operaciones, en los contratos de Asociación Tauramena, Río Chitamena, Piedemonte y Recetor en los municipios de Tauramena, Aguazul y Yopal en el Departamento del Casanare, que se encuentra situado en el oriente del país, en la región de la Orinoquía, localizado entre los 04°17'25" y 06°20'45' de latitud norte y los 69°50'22" y 73°04'33" de longitud oeste.

Figura 4 Operación EQUION en Casanare



Fuente: EQUION

Cada contrato de asociación tiene unas instalaciones centrales de producción o CPF por siglas en Ingles (Central Production Facilities)

Contrato de Asociación	Nombre
Piedemonte	CPF Floreña
Tauramena	CPF Cusiana
Recetor	EPF Recetor

Las instalaciones centrales de producción (CPF Central Production Facilities) de Floreña se encuentran ubicado en el Corregimiento del Morro 5°34'18"N

72°19'38"O, en el noroccidente del Municipio de Yopal aproximadamente a 15 kms de Yopal.

Figura 5 Panorámica CPF Floreña



- Separación:
  - 2 Trenes producción: 20 MBPD
- Inyección:
  - 8 Comp. 78 MM
  - 3 Comp. 13 MM
  - 2 Comp. Boost. 62MM
  - 4 Comp Media 2 MM
- Gen: 2 - 1.5 MW/1 - 1 MW

**Floreña**

Fuente: EQUION

CPF de Cusiana, ubicada en el piedemonte de los llanos orientales aproximadamente a 330 Km. al noreste de Bogotá, 60 Km. al suroeste de Yopal y en la meseta del aceite a unos 5 Km. al oeste de Tauramena en el departamento de Casanare.

Figura 6 Panorámica CPF Cusiana



- Separación:
  - Fase 1: 4 Trenes 160 MBPD
  - Fase 2: 2 Trenes 180 MBPD
- Inyección:
  - Fase 1: 24 Comp. 396 MM
  - Fase 2: 3 MP / 3 HP Turb. 1150 MM
- Gen: 2 Gas / 1 Dual 60 MW

**Cusiana**

- Proceso:
  - Planta de Gas Ventas 180 MM
  - LTO I: 140 MM
  - Planta de Ventas 40 MM
  - LTO II: 70 MM
  - Planta ECP: 20 MM

**SGP 270 MM**

Fuente: EQUION

Las instalaciones de Recetor se encuentran ubicadas al norte del municipio de Aguazul, aproximadamente a 40 kms de Yopal.

Figura 7 Panorámica EPF RECETOR



- Separación:
- Tren Producción: 40 MBPD
- Manejo de Gas: 200 MM
- Boosting: 5 COMP 200 MM
- Inyección: 5 COMP 135 MM
- Transf.: 65 MM

Recetor

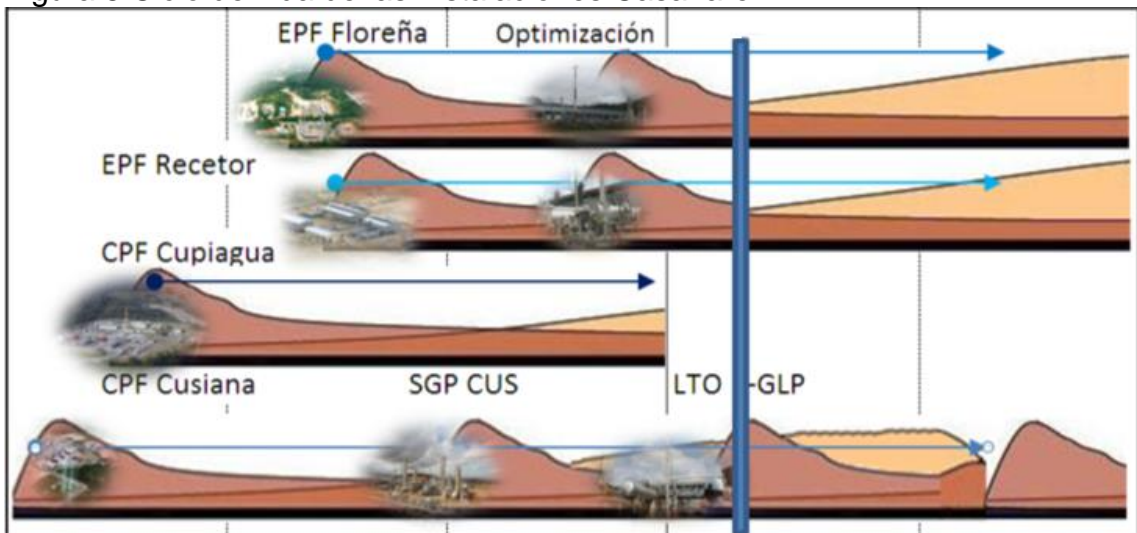


Fuente: EQUION

#### 1.4 OPERACIÓN EQUION<sup>5</sup>

Por más de 25 años EQUION ha desarrollado actividades de exploración y producción de hidrocarburos en el departamento de Casanare, donde son operadores de cuatro Contratos de Asociación con Ecopetrol: Piedemonte, Recetor, Tauramena y Río Chitamena (estos dos últimos, ahora en compañía de Emerald Energy).

Figura 8 Ciclo de vida de las Instalaciones Casanare



Fuente: EQUION

<sup>5</sup> [http://www.equion-energia.com/nuestras\\_operacion/Paginas/default.aspx](http://www.equion-energia.com/nuestras_operacion/Paginas/default.aspx)

En la actualidad, la producción operada asciende a 100 mil barriles equivalentes de petróleo por día; y EQUION tiene reservas y recursos equivalentes de petróleo estimados de 63 millones de barriles en los campos productores de Floreña, Pauto, Dele y Cusiana. Las tres instalaciones principales nos permiten una capacidad combinada de procesamiento de 200 mil barriles de crudo y 1.300 millones de pies cúbicos de gas por día.

En cuanto al negocio de gas, los campos albergan reservas significativas que durante mucho tiempo se reinyectaron casi en su totalidad para mantener la presión del yacimiento y optimizar el factor de recobro de crudo campos. Sin embargo, la evolución en las condiciones del mercado y la creciente demanda de gas en los diferentes sectores de la economía colombiana se unieron para facilitar la participación en el mercado a largo plazo y en la monetización de estas reservas.

En la actualidad la atención hoy se centra en el desarrollo completo de la licencia Piedemonte, ubicada en el Corregimiento de El Morro, en el Municipio de Yopal. Este proyecto incluye la expansión de las instalaciones de procesamiento de Floreña, así como la construcción de líneas de flujo y la perforación de varios pozos.

## 1.5 DESCRIPCIÓN GENERAL PROCESO DE PRODUCCIÓN

En el proceso del petróleo se aplican diferentes técnicas para estimular y mejorar la producción, como son: producción primaria, producción temprana, inyección de vapor e inyección de agua.

Tabla 1 Descripción de Equipos Mayores Operación EQUION en Casanare

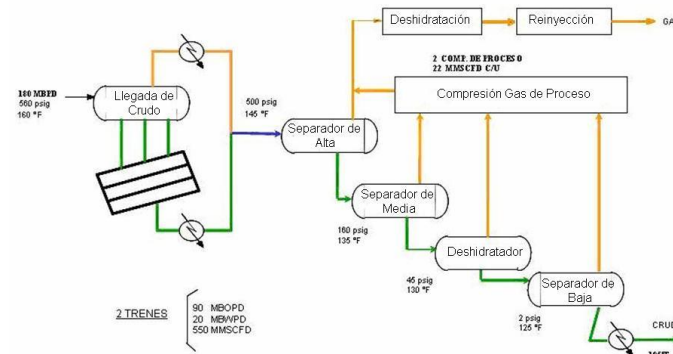
CAN	EQUIPO ROTATIVO MAYOR	EQ. MOTRIZ	EQ. CONDUCTIVO	POTENCIA	UBICACIÓN
6	Turbocompresor	Turbina a gas GE MS-5002-C	Compresor Nuovo Pignone BCL 506-A, Media Presión BCL 406-C, Alta Presión	38000 HP/28380 KW	CPF CUSIANA
3	Bombas Reinyección de Agua	Motor Westhing-House	WEIR PUMP	5500 HP	CPF CUSIANA
3	Turbogenerador	Turbina a gas GE MS-5001PA	Generador John Brown	20970 KW	CPF CUSIANA
34	Moto Compresores Reciprocantes	Motores: -Caterpillar -Waukesha -Superior	Compresores: -Superior: MH/WH -Ariel: JGA/JCA	3000 @3500 bHP	EPF RECETOR CPF FLOREÑA
12	Moto Generadores Reciprocantes	Waukesha Cummins Superior	Kato	1000 KW	EPF RECETOR CPF FLOREÑA
2	Moto bombas	Caterpillar 3508	Sulzer	680 HP	CPF CUSIANA
Total 60	Equipos				

Fuente: EQUION

En las instalaciones de Casanare se utiliza sistemas de producción temprana e inyección de agua, que consiste en inyectar al yacimiento el gas y el agua

producida para mantener la presión en los pozos e impulsar el petróleo para que fluya normalmente hasta la superficie. Además de incrementar la producción de petróleo, el gas es inyectado para dar cumplimiento a la legislación colombiana que no permite la quema de gas.

Figura 9 Diagrama del Proceso del Crudo



Fuente: EQUION

El objetivo del tratamiento del petróleo en las instalaciones es retirarle el agua y exceso gas con el fin de reunir las especificaciones de entrega al oleoducto para la exportación.

El proceso del hidrocarburo en el CPF de Cusiana se divide en:

- Utilitarios: Este sistema está conformado por los compresores de aire, nitrógeno y toda la red de distribución. Esta red es responsable de la mayoría de señales automáticas de protección de los equipos.
- Sistema Gas Combustible: Para las unidades a gas es necesario asegurar el "Fuel Gas" en condiciones de Humedad, Pesados.

Figura 10 Compresor de Aire



Fuente: EQUION

Figura 11 Planta de Fuel Gas



Fuente: EQUION

- Contra incendio: El sistema contra incendio está conformado por las bombas, red y los hidrantes para control de incendios.

Figura 12 Sistema Contra incendio



Fuente: EQUION

- Llegada de crudo (slug catcher): debido a la topografía del terreno el flujo desde los pozos productores hasta los CPF presenta variaciones significativas por lo tanto antes de entrar al proceso es necesario normalizar los caudales de flujo. Los líquidos que llegan a las instalaciones son una mezcla de gas, agua y crudo.

Figura 13 Llegada de Pozos



Fuente: EQUION

Figura 14 Slug Catcher



Fuente: EQUION

- Despacho: el crudo que cumple las especificaciones del oleoducto y sin exceso de agua es bombeado a los tanques de almacenamiento.

- Separación o gas de proceso: el crudo almacenado desprende vapor de gas a presión ambiental, y cada etapa desprende gas, aquí se inicia el proceso del gas.

Figura 15 Sistema de Despacho



Fuente: EQUION

Figura 16 Separador Bifásico



Fuente: EQUION

- Reinyección de gas: los yacimientos de los campos de Casanare son ricos en gas, este cuando se separa tiene una presión de 500 psig, se incrementa la presión usando: turbocompresores o Motocompresores y se inyecta en pozos de inyección.

Figura 17 Turbocompresor Media Presión



Fuente: EQUION

Turbina: General Electric MS-5001C.

Potencia: 30000 BHP

Compresor: Centrifugo Nuovo Pignone BCL 504/A

Presión Descarga: 2473

Figura 18 Turbocompresor de Alta Presión



Fuente: EQUION

Turbina: General Electric MS-5001C.

Potencia: 28700 BHP

Compresor: Centrifugo Nuovo Pignone BCL 406/C Presión

Descarga: 5600 Psi

Figura 19 Moto Compresor Reciprocante de Alta Presión



Motor: Waukesha  
L7044 GSI. Potencia:  
1680 HP

Compresor:  
Reciprocante  
Superior MH-64

Flujo: 10 MMSCFD

Figura 20 Moto Compresor Reciprocante de Inyección



Motor: Caterpillar  
3608.

Potencia: 2500 HP

Compresor:  
Reciprocante  
Superior WH-66

Flujo: 18 MMSCFD

Proceso Boosting: Para mejorar el recobro de los pozos productores, es necesario bajar la presión en cabeza de pozo, sin embargo este proceso necesita compresores con gran capacidad de manejo de gas a baja presión.

Figura 21 Moto Compresor Boosting Recetor



Fuente: EQUION

Motor: Caterpillar  
3612.

Potencia: 3550 HP

Compresor:  
Reciprocante  
Superior WH-64

Flujo: 25 MMSCFD

Figura 22 Moto Compresor Boosting Floreña



Fuente: EQUION

Motor: Caterpillar  
3612.Potencia: 3550  
HP

Compresor:  
Reciprocante Ariel  
JGC4

Flujo: 32 MMSCFD

- Generación Eléctrica: Puesto que la mayoría de equipos son motores eléctricos, se genera la energía eléctrica que se consume.

Figura 23 Moto generador a Gas Floreña



Fuente: EQUION

Motor: Superior  
16SGT.

Potencia: 2000 HP

Potencia: 2MW

Figura 24 Moto generador a Gas Recetor



Fuente: EQUION

Motor: Waukesha  
L7042 GSI.

Potencia: 1200 HP

Potencia: 1MW

Tabla 2 Equipos Principales Operación EQUION en Casanare

<b>Campo</b>	<b>Sistema</b>	<b>Tipo</b>	<b>Cantidad de Equipos</b>
<b>Cusiana</b>	Bombas_Booster	Centrifugas	2
	Bombas_Wire	Centrifugas	3
	Demag	Compresor Centrifugo	2
	Fase_2	Turbocompresor	6
	Generacion	Turbogenerador	3
	SGP_Boosting	Reciprocante	2
	SGP_Gas_Acido	Reciprocante	2
	Turbo_Expander_LTO1	Turboexpansor	2
	Turbo_Expander_LTO2	Turboexpansor	1
	<b>FLO_C6</b>	Bombas_Booster_C6	Centrifugas
Bombas_Transferencia_C6		Centrifugas	2
Generacion_C6		Reciprocante	2
Inyeccion_C6		Reciprocante	2
<b>Floreña</b>	Bombas_Exp_crudo_Booster	Centrifugas	3
	Bombas_Exp_crudo_Ppal	Centrifugas	3
	Bombas_Exportacion	Centrifugas	4
	Bombas_Exportacion_agua	Centrifugas	4
	Fase_1	Reciprocante	5
	Fase_2_Flo	Reciprocante	4
	Fase_3	Reciprocante	2
	Generacion_flo	Reciprocante	7
	Inyeccion_Expansion	Reciprocante	4
	Media_Proceso	Reciprocante	4
	Pauto_Sur_C2	Reciprocante	2
	Proceso_Expansion	Reciprocante	3
	<b>GX_39</b>	Bombas_Exportacion_GX	Centrifuga
Generacion_GX		Reciprocante	3
Inyeccion_GX		Reciprocante	1
<b>Recetor</b>	Bombas_de_Transferencia	Centrifuga	4
	Boosting	Reciprocante	5
	Generacion_Rec	Reciprocante	5
	Inyeccion	Reciprocante	5

Fuente: EQUION

## **1.6 ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO E INTEGRIDAD EQUION**

### **1.6.1 Filosofía de Mantenimiento EQUION<sup>6</sup>**

La estrategia de Mantenimiento comprende una serie de elementos evaluables que soportan la operación de EQUION ENERGIA LIMITED en búsqueda de la excelencia operacional. Todo el grupo de trabajo, la organización de mantenimiento, tiene la responsabilidad de asegurar que los activos son mantenidos adecuadamente, es decir hacer el trabajo correcto en el momento correcto.

EQUION ENERGIA LIMITED busca nuevas formas de administrar el Mantenimiento y la confiabilidad, siendo más seguros y creando valor. Los planes incluyen objetivos medibles para las actividades de mantenimiento con el fin de lograr el desempeño clase mundial.

La meta de EQUION ENERGIA LIMITED es llevar a la práctica los mejores procesos de mantenimiento y confiabilidad dentro de la industria y verificar el desempeño con sistemas auditables y procesos de benchmarking.

EQUION ENERGIA LIMITED en sus orígenes en BP, desarrolló diferentes iniciativas en búsqueda de la excelencia operacional y los resultados de estas se reflejan en gran parte en los avances hacia una cultura de confiabilidad.

La mayoría de los procesos implementados se derivan de los seis elementos delineados dentro de la estrategia de mantenimiento como base de una cultura enfocada en la confiabilidad.

- Liderazgo y organización
- Disponibilidad de la facilidad
- Administración de la labor
- Administración de los materiales
- Manejo del cambio
- Mejoramiento continuo

Una administración de activos enmarcada dentro una cultura de confiabilidad busca entender los activos en su contexto operacional antes de la ocurrencia de cualquier falla funcional a través de una implementación de una estrategia de confiabilidad proactiva que permita de manera rentable eliminar las posibles causas de fallas y minimizar sus consecuencias, estableciendo un ambiente donde las fallas de los equipos estén predeterminadas y sus efectos bajo control.

---

6 PRA-1201304(FILOSOFIA\_DE\_SIA\_EQUION) , Práctica - Filosofía de Mantenimiento Superintendencia de Integridad y Activos de Equión Energía Limited, Julio 2015 Rv1.

Esto provee la base para enfocar al personal de mantenimiento y operaciones, y demás recursos, en los equipos que tienen mayor impacto en los objetivos del negocio. La estrategia dentro del contexto de confiabilidad debe guiar a la organización al área de las facilidades de producción donde debe enfocar sus esfuerzos.

La estrategia de Mantenimiento busca establecer un proceso continuo de mejora que finalmente debe conducir a una estrategia de confiabilidad específica para cada equipo con base en su desempeño actual.

Como parte de la cultura de confiabilidad se deben generar cambios culturales significativos, ahorro de costos e incrementos en la disponibilidad. Para lograr un cambio cualitativo y de largo plazo se debe cambiar la forma de pensar. Es un camino a recorrer más que un destino final. Lo que implica un proceso continuo de evaluación, planteamiento de mejoras y revisión de la efectividad de las acciones tomadas. La estrategia debe proveer las bases para el cambio cultural.

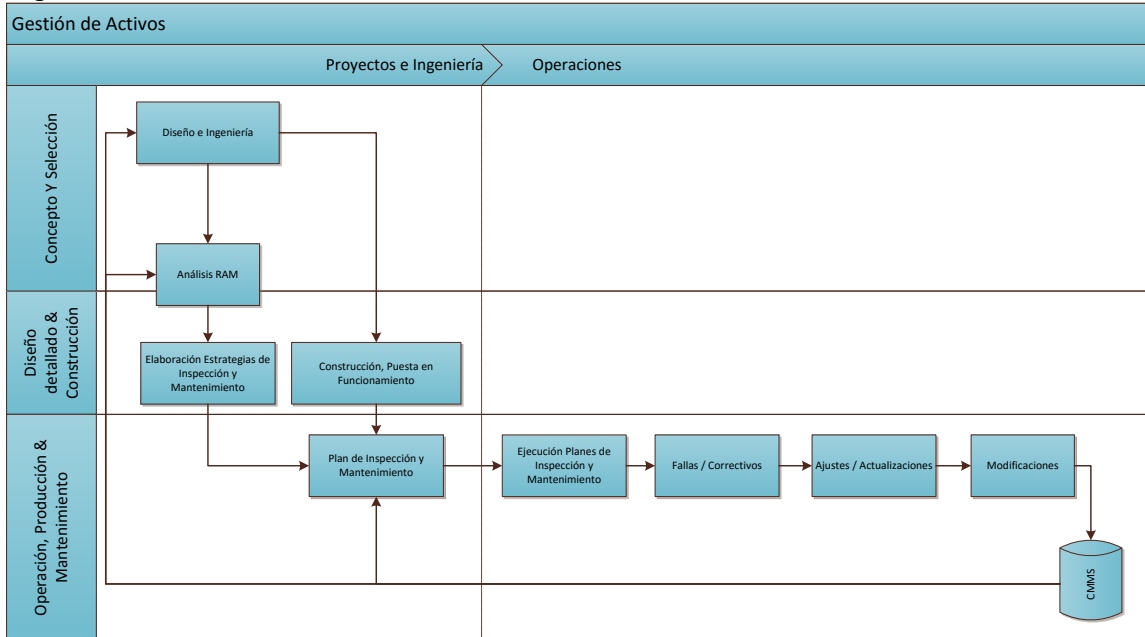
La ruta de la inocencia hasta la excelencia en mantenimiento se muestra en la siguiente matriz. El viaje consiste en la ejecución de múltiples procesos para pasar de un enfoque reactivo a un ambiente proactivo. A continuación se detalla el progreso a lo largo de los siguientes elementos:

- Estrategia.
- Administración y organización.
- Planeación y programación.
- Técnicas de mantenimiento.
- Medidas de desempeño.
- Tecnologías de la información.
- Involucramiento del personal.
- Análisis de confiabilidad.
- Análisis de los procesos.
- Estructura e instalaciones
- Gestión de activos con base en Pas 55 – ISO 55000

### **Gestión de activos**

La estrategia de mantenimiento busca enfocar la organización en la confiabilidad de los equipos y de los sistemas como una estrategia de mejoramiento del desempeño financiero. Una estrategia efectiva de confiabilidad típicamente debe resultar en una reducción del 20-35% de los costos de Mantenimiento acompañada por un aumento de la producción sin inversión adicional.

Figura 25 Proceso de Gestión de Activos EQUION



Fuente: EQUION

La manera más efectiva de incrementar la productividad de los activos es maximizando su utilización, por medio del incremento de la confiabilidad.

Los tres principios básicos están entrelazados en la estrategia de mantenimiento:

1. La estrategia consiste en un conjunto bien definido de modelos de procesos de negocio ligados a la documentación de apoyo que determinan la forma en que se realiza el trabajo.
2. En la estrategia se establecen medidas de desempeño que reflejan claramente la adopción de comportamientos nuevos y hace seguimiento a las tendencias y al logro de los objetivos que resultan de dichos cambios.
3. La estrategia soporta el desarrollo de un ambiente de aprendizaje y la cultura de confiabilidad que redundará en desarrollo del personal y mejoramiento de la utilización de los activos.

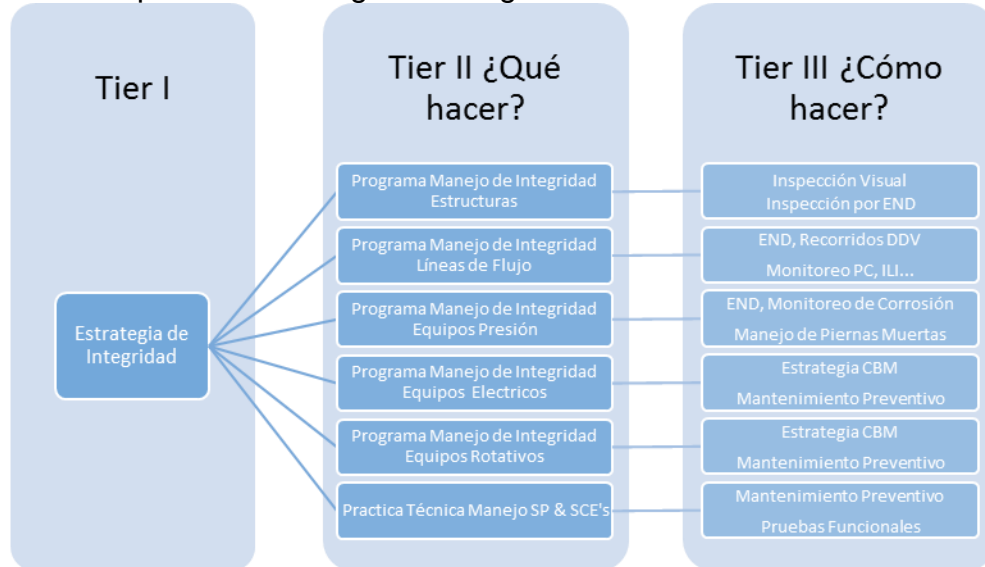
La estrategia define la ruta hacia el incremento en la utilización de activos.

## 1.7 ESTRATEGIA DE INTEGRIDAD EQUION

En EQUION el Manejo de la Integridad puede definirse como un proceso de evaluación continua que se aplica a las instalaciones durante todo su ciclo de vida e incluye las fases de diseño, fabricación, montaje, comisionamiento, operación, mantenimiento y decomisionamiento para asegurar que se conserven de forma

segura, para asegurar que la maquinaria instalada en las facilidades, cumpla su propósito operativo evitando en todo momento la pérdida de contención de estos fluidos.

Figura 26 Esquemas Estrategia de Integridad EQUION



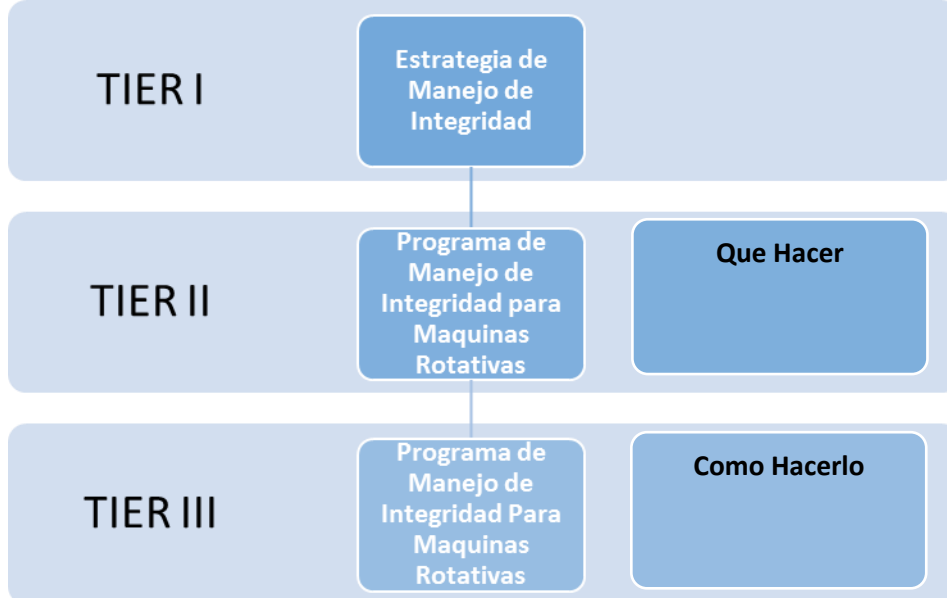
Fuente: EQUION

La descripción del alcance, estándares aplicables, evaluaciones de desempeño y lecciones aprendidas se encuentran consignados en las Estrategias de Manejo de Integridad Tier II como el ¿Qué hacer? y Tier III ¿Cómo hacerlo? Respectivamente.

La estrategia de mantenimiento e inspección de EQUION, se desarrolló bajo la metodología de la estrategia global de mantenimiento de BP (CMS- BP Common Maintenance Strategy) y el Integrity Management Standard (GDP 5.0-0001 Revisión Octubre 23 2008), sin embargo desde el Cambio de BP hacia EQUION, se incluye para equipo rotativo de las facilidades de superficie de la operación EQUION en Casanare que incluyen las actividades de mantenimiento preventivo, pruebas funcionales, inspecciones (RBI), mantenimiento por condición, mantenimiento por oportunidad y mantenimiento correctivo.

La estrategia de mantenimiento hace referencia a dos procesos centrales de evaluación y mitigación de riesgo: Plan específico de mantenimiento a equipos (ESMP) y Mantenimiento Basado en Condición (CBM).

Figura 27 Estrategia de Manejo de Integridad Equipo Rotativo



Fuente: EQUION

EQUION ha decidido ejecutar el mantenimiento global de sus Instalaciones mediante un contratista aliado, encargado de la planeación y ejecución de todas las tareas de mantenimiento predictivo, preventivo, correctivo.

### 1.7.1 Equipment Specific Maintenance Plan (ESMP)

Este proceso revisa los equipos individualmente y determina el tipo apropiado de mantenimiento proactivo (preventivo, predictivo y monitoreo de condición) necesario, para mantener la confiabilidad e integridad de los equipos. Este proceso es ejecutado en la definición de la estrategia de mantenimiento, especialmente cuando no se tiene información previa del comportamiento a falla de los equipos.

Este proceso utiliza una metodología de administración del riesgo, en la cual son evaluados integralmente los mecanismos de falla de los equipos, frecuencia de ocurrencia y severidad. La clave para determinar la cantidad adecuada de mantenimiento, y cuando es apropiado correr a falla, se apoya en el entendimiento de los modos y efectos de falla en un disciplinado Análisis de Modo y efecto de Falla FMEA, y determinando las tareas para predecir, prevenir o mitigar la consecuencia de la falla. Los principales Modos de falla asociados a cada tipo de maquinaria.

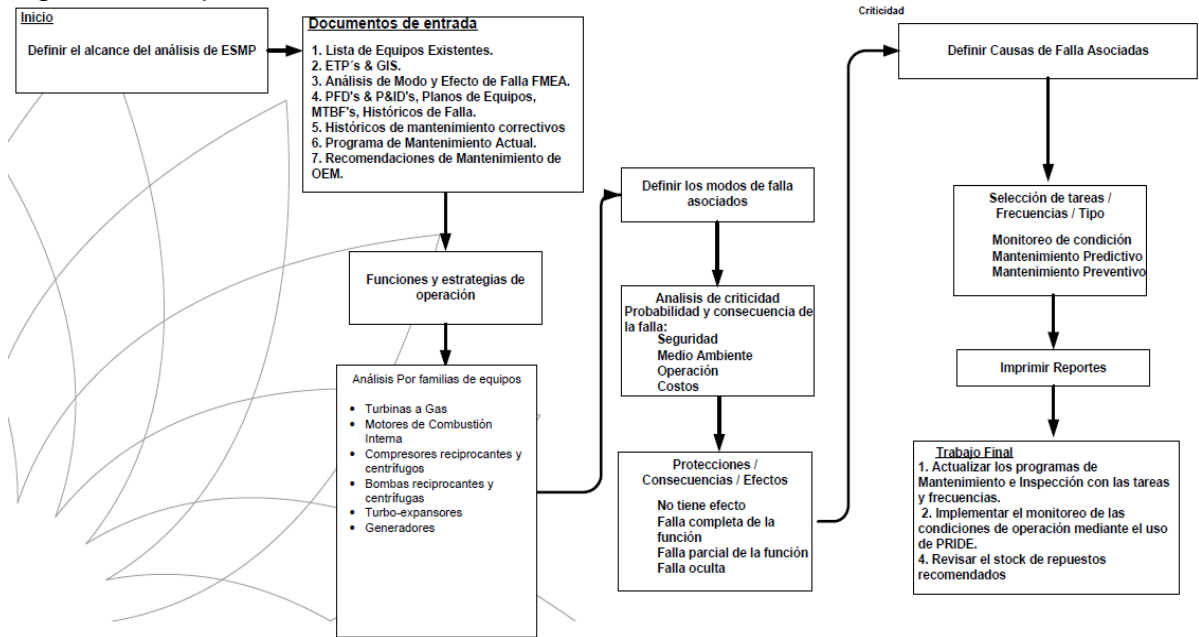
La estrategia de integridad de equipo rotativo se soportará en el proceso de ESMP, el cual además es un método que analiza sistemáticamente las áreas

funcionales mayores de un proceso (grupo de equipos con un propósito específico), para determinar la criticidad / necesidad de la función para la facilidad y asignar las tareas específicas de mantenimiento, operación e integridad requeridas para la operación segura de los equipos.

El proceso de ESMP requiere información de entrada, esta información es importante para definir adecuadamente la estrategia de mantenimiento e integridad de todos los equipos. Entre los documentos de entrada tenemos:

1. Listado de equipos: Define con exactitud los equipos rotativos sobre los cuales se enfocará el estudio de ESMP y sus resultados.
2. FPD's (Diagramas de Flujo de Proceso) y P&ID's (Diagrams de proceso e instrumentación): Definen las fronteras de los equipos y la instrumentación asociada, la cual generalmente representa barreras de protección inherentes al sistema, y cuya función es reducir el riesgo de falla catastrófica.
3. ETP's (Prácticas de Ingeniería) y GIS (Estándares Internacionales): Contienen información esencial para el cumplimiento de la estrategia de integridad, dado que reúnen conocimiento especializado sobre cada familia de equipos y su aceptabilidad para operar en las condiciones que requiere la industria del gas y el petróleo.
4. FMEA (Análisis de modo y efecto de falla): Define los modos y efectos de falla para cada familia de equipos, basado en la norma ISO 14224. Los principales Modos de falla asociados a cada tipo de maquinaria.
5. Programa de mantenimiento actual (Si existen): Se debe utilizar como base inicial al proceso de implementación de la estrategia de integridad, operación y mantenimiento de los equipos rotativos.
6. Otros (Si existen): MTBF, Planos de equipos, históricos de mantenimiento e históricos de falla, documentos que recopilan información sobre la operación y mantenimiento anterior para dar mayor precisión a la estrategia de integridad, operación y mantenimiento de equipos rotativos.

Figura 28 Esquema Desarrollo ESMP



Fuente: EQUION

El proceso ESMP es aplicado a jerárquicamente a cada una de las plantas que componen la operación, cada familia de equipos, y finalmente cada equipo particular. Como producto del análisis son elaboradas unas rutinas de Mantenimiento preventivo PM a cada uno de los equipos de la planta con una frecuencia sugerida para alimentar el plan de mantenimiento. Estas rutinas pueden ser de tipo preventivo o de monitoreo. Las rutinas de monitoreo alimentan la estrategia de mantenimiento basado en condición, la cual se basa en la determinación del estado de componentes como método para la administración del riesgo.

## **1.8 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La metodología actual para priorizar las intervenciones de mantenimientos de los equipos mayores de la operación de Equion en Casanare no tiene en cuenta los impactos en la producción. Actualmente se disparan las rutinas de mantenimiento basadas en tiempo y se realiza la solicitud a operaciones quienes por manejo del campo entregan los equipos a discreción del supervisor de operaciones.

La estrategia actual no contempla la integración de las variables de confiabilidad, Integridad de equipo estático asociado al equipo rotativo, así como la dinámica operacional de los campos, siendo esta última la cual toma en la actualidad una importancia significativa dada la edad de los diferentes campos, es por ésta razón que se hace necesario la creación de un modelo que permita realizar gestión de los activos principales evaluando el riesgo y retando los procesos para asegurar la confiabilidad y disponibilidad de la maquinaria integrando la seguridad de los procesos para no afectar a las personas al medio ambiente y los activos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar metodología para priorizar las intervenciones de mantenimiento basados en confiabilidad e impacto de los equipos mayores de EQUION en Casanare.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar el comportamiento de las fallas de los equipos principales de la operación EQUION en Casanare, para generar un estatus con la condición de los componentes críticos de la maquinaria.
- Establecer la metodología de evaluación de la confiabilidad, condición e impactos en la producción.
- Desarrollar ranking de criticidad dinámico de equipos a los cuales se les debe hacer intervenciones de mantenimiento, teniendo en cuenta su confiabilidad, condición y su impacto en la producción.
- Definir la metodología de interacción del ranking con el proceso de planeación integral y producción para disminuir las pérdidas por paradas no programadas.

### 3 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 FUNDAMENTOS DE MANTENIMIENTO.

Se puede decir que mantenimiento son todos cuidados necesarios para asegurar que los equipos y sus partes sigan desempeñando las funciones para las cuales fueron instalados. El fabricante define los intervalos de tiempo en primera instancia y luego son definidas por el dueño del activo. <sup>7</sup>

El mantenimiento tiene como objetivos: conservar los equipos en condiciones óptimas para cumplir la función para la cual fueron instalados, satisfacer los requisitos del sistema de calidad y cumplir con las normas.

Una de las preguntas a resolver es ¿qué se entiende por falla? En términos de mantenimiento, de acuerdo a la Norma ISO 14224<sup>8</sup>, se puede decir que una falla es la terminación de la capacidad de un elemento para realizar una función requerida.

A través del tiempo el mantenimiento ha ido evolucionando en diferentes etapas desde el mantenimiento correctivo hasta el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), a continuación, se describe la evolución del mantenimiento:

1. La primera etapa es el correctivo: se lleva a cabo con el fin de corregir una falla en el equipo. Se clasifican en: no planeado; mantenimiento de emergencia y se debe reparar las fallas de forma inmediata y el planificado; las fallas en los componentes permiten programar con anterioridad las reparaciones.
2. La segunda etapa se denomina mantenimiento preventivo: consiste en programar intervenciones periódicas a los equipos más importantes para detectar y evitar fallas en sus componentes sin considerar las peculiaridades de la instalación o funcionamiento.
3. La tercera etapa es el mantenimiento predictivo o basada en condición (Condition Based Maintenance CBM). Que consiste en la aplicación de tecnologías en el proceso de detección temprana de fallas y descubrir cambios en las condiciones de los equipos que permitan intervenciones más oportunas y precisas. Las características fundamentales de CBM son:

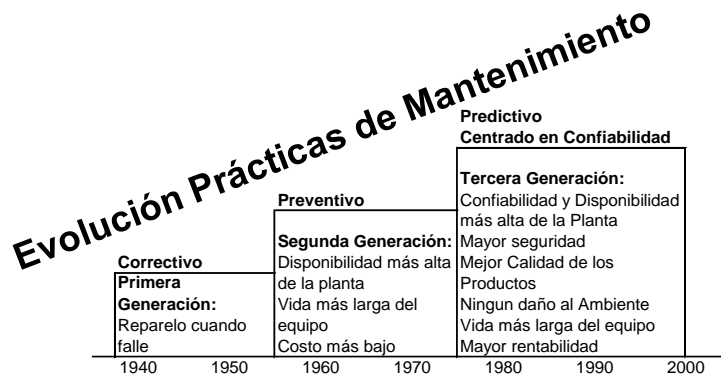
---

<sup>7</sup> PRANDO. Raúl R. Manual Gestión de Mantenimiento a la Medida.1996. p.19.

<sup>8</sup> ISO 14224 Petroleum, petrochemical and natural gas industries -- Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.2005.

- Determinar las condiciones del equipo evitando al máximo las paradas innecesarias.
- Monitorear y hacer seguimiento al comportamiento del equipo detectado con problemas y así poder programar el mantenimiento.
- Reducir los costos de mantenimiento debido al uso máximo de los componentes.
- Mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos.

Figura 29 Evolución Prácticas de Mantenimiento



Fuente: RCM II Aladon Ltd.

- La cuarta etapa es el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) <sup>9</sup>. Esta metodología fue desarrollada por John Moubray de Aladon Ltd. Se define como la filosofía de gestión de mantenimiento, en la cual un equipo multidisciplinario de trabajo, se encarga de optimizar la confiabilidad operacional de la maquinaria y también es un método organizado lógico y documentado para construir o modificar una estrategia de mantenimiento conservando un balance óptimo entre el costo y la confiabilidad del servicio.

### 3.2 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El programa de mantenimiento preventivo de EQUION busca fundamentalmente corregir de forma periódica las condiciones evidentes de desgaste, obsolescencia o daño, a partes de maquinaria, y que hacen parte del proceso normal de envejecimiento, desgaste producido por el régimen de servicio de las unidades. Este proceso busca restablecer las condiciones originales de integridad de los equipos rotativos.

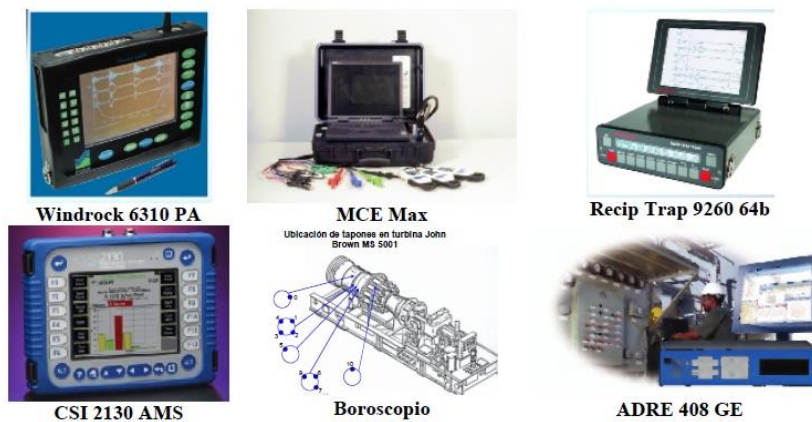
<sup>9</sup> PRANDO. Raúl R. *Ibíd.*, p 22.

Los equipos cubiertos por esta estrategia son relacionados a continuación, y sus límites se encuentran definidos en el estándar ISO 14224 anexo A. Estos límites en general se concentran entre bridas de succión y descarga de los fluidos de proceso, combustible, agua y utilitarios. Turbinas a Gas, Compresores Reciprocantes y Centrífugos, Motores de Combustión Interna, Bombas Reciprocantes y centrifugas, Turboexpansores, Generadores y Aeroenfriadores.

El alcance del mantenimiento preventivo está alimentado fundamentalmente por dos elementos: Como producto de un análisis de modos, efectos y causas de falla (FMECA) y las recomendaciones del fabricante (OEM), en el cual se determinan los modos de falla comunes, y mediante un análisis de probabilidad e impacto, son generadas en frecuencia periódica específicas tareas preventivas de inspección, ajuste y reemplazo de partes de evidente desgaste o condición deficiente.

Este programa contempla una estrategia de Mantenimiento basada en condición CBM, la cual se encarga de monitorear periódicamente parámetros críticos de comportamiento de las unidades, y mediante su interpretación emitir un juicio sobre la condición general del equipo y los ajustes e intervenciones específicas. Al igual que las prácticas de mantenimiento, la estrategia de CBM en EQUION ha sufrido cambios significativos, desde que se monitoreaban equipos, usando impulsos de choque con un SPM A30, hasta la actualidad que se realizan mediciones de Vibración, Ultrasonido, Presiones, Termografías, con equipos CSI 2130, MCEmax, ADRE 408, entre otros.

Figura 30 Tecnología usada en Mantenimiento Predictivo



Fuente: EQUION

Teniendo en cuenta las características de cada equipo, la potencia, el tiempo en operación, el impacto a la producción, y la criticidad establecida por EQUION para sus equipos, se realiza una combinación de estos factores se establece: el tipo de tecnología a usar, la frecuencia de monitoreo, un estimado de las horas hombre

(HH) a usar y se documentan en la estrategia de mantenimiento cargada en el CMMS.

Figura 31 Aplicación de la tecnología en Mantenimiento Predictivo



Fuente: STORK

### 3.2.1 El concepto básico de mantenimiento predictivo (PdM)

Aunque las tecnologías de mantenimiento predictivo pueden llegar a ser muy complicadas, el concepto básico de PdM es bastante simple: La mayoría del equipo industrial de repente no se descompone y deja de funcionar. La verdad es que el equipo se descompone poco a poco - en un periodo de semanas o meses. Además, emite numerosas señales de advertencia a lo largo del camino.

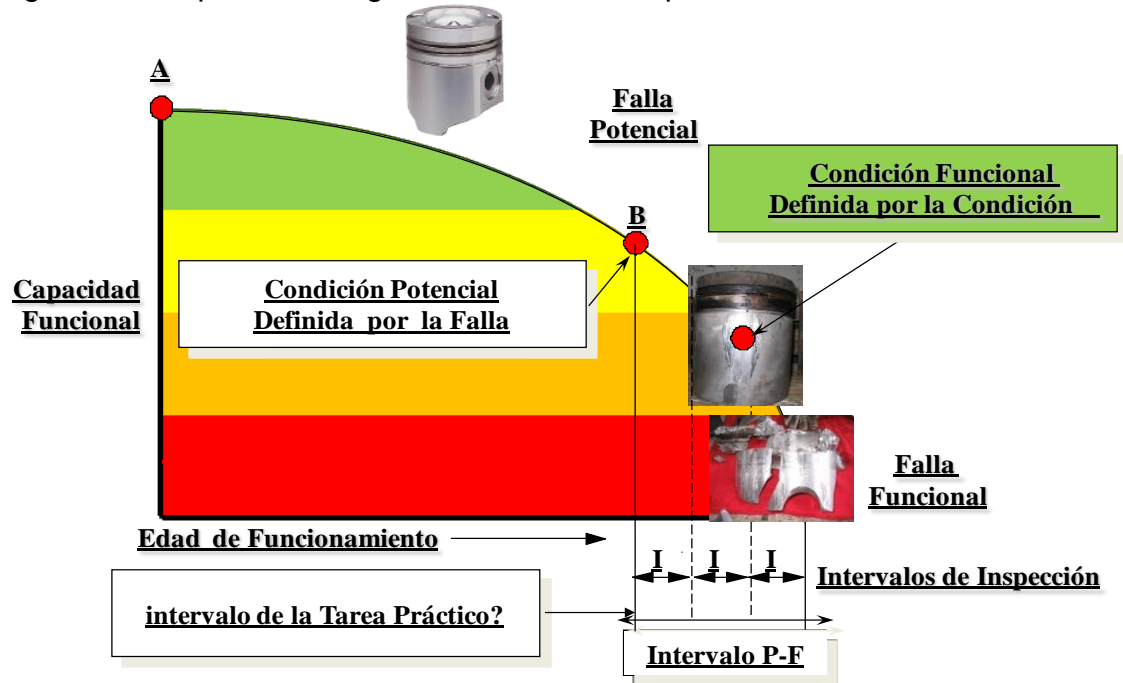
Estas señales de alerta temprana - por ejemplo, pequeños cambios en la temperatura, vibración o sonido - pueden ser detectados por las tecnologías de PdM. Como resultado, PdM le da tiempo para planificar, programar y hacer las reparaciones - antes de que el equipo falle, en la siguiente figura se ilustra este concepto, En conclusión es, cuando se trata de mantenimiento, el tiempo es dinero.

La diferencia en los costos de reparación entre el tiempo de un especialista PdM puede detectar problemas en el equipo hasta el momento en que un operador se da cuenta de que puede ser enorme. De hecho, un estudio demostró que el costo de la impulsada por PdM, mantenimiento proactivo es la mitad que el de emergencia o mantenimiento avería.

Ninguna otra estrategia de mantenimiento le da más tiempo para la planificación y la programación que el mantenimiento predictivo avanzado. Es por eso que PdM debe ser la fuente de mantenimiento planificado. Los estudios han demostrado

que un trabajo de reparación bien planificado toma típicamente sólo la mitad de tiempo que un trabajo planificado. La labor prevista es siempre más eficiente y menos costosa que el trabajo planificado.

Figura 32 Adaptación Diagrama P-F PdM Reciprocantes



Fuente: EQUION

### 3.3 ESTRATEGIA CBM ESTRUCTURAS

Alineados con las Políticas de Seguridad de Proceso, en EQUION se establece la medición de vibración como herramienta para la detección temprana de fallas en estructuras.

Esta estrategia incluye las tareas de Recolección de Información, Monitoreo, Análisis, Simulación con Software ME'scope, Reporte y Generación de ODT de Corrección con las recomendaciones, además incluye la medición de verificación una vez instalado o corregida las desviaciones.

Esta estrategia se desarrolla siguiendo una secuencia ordenada:

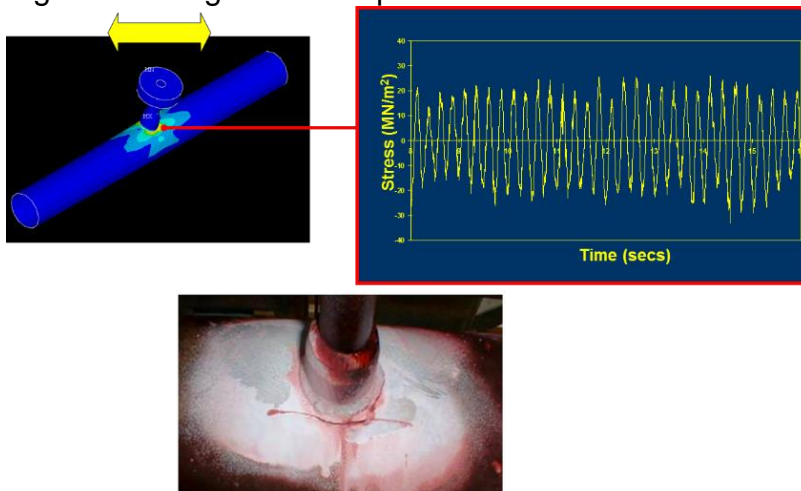
- Inicialmente con recorridos e inspecciones en campo para determinar las ubicaciones de cada estructura.
- Se realiza una evaluación Cualitativa y Cuantitativa de los Riesgos Asociados
- Mediante mediciones de vibración con Analizador CSI 2130 en campo en las Tuberías, Soportes y estructuras se determina la condición.

- Luego se evalúa la condición, teniendo en cuenta naturaleza, tipo, intensidad se desarrollan soportes temporales (PRT), se instalan en sitio y se verifica el efecto.
- Usando el ERP SAP se elaboran ordenes de mantenimiento (ODM) para la instalación definitiva de Soportes, en la ODM se describe el tipo y la ubicación de los soportes recomendados.
- Una vez el soporte ha sido instalado se hace una medida de verificación

### 3.3.1 Fatiga inducida por Vibración <sup>10</sup>

¿Qué es la fatiga inducida por vibración? Es el daño de parte de una estructura por la iniciación y propagación gradual de una grieta o grietas - causadas por la repetición de concentraciones de estrés generada por la vibración...”

Figura 33 Fatiga inducida por vibración

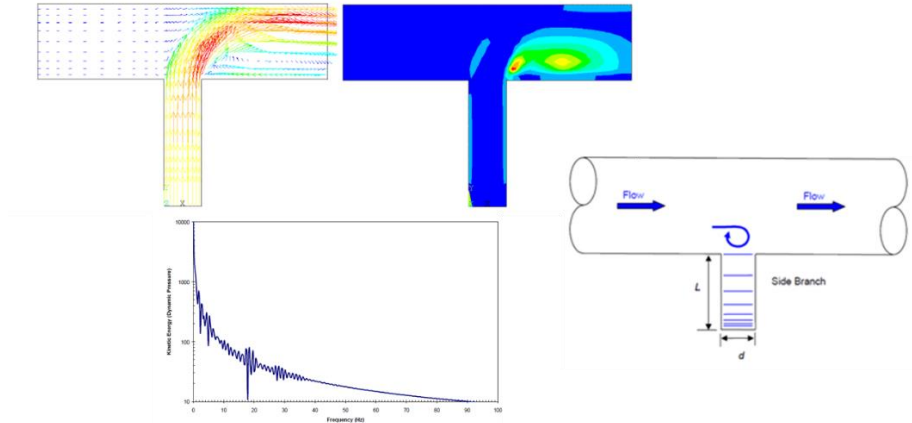


Fuente: Bureau Veritas

¿Qué causa la fatiga inducida por vibración? Algunas causas comunes de la Fatiga Inducida son: Turbulencia Inducida por el Flujo, excitación Mecánica, Pulsaciones, Un ejemplo de la distribución de la energía cinética debido a la turbulencia generada por el flujo en una Tubería.

<sup>10</sup> BUREAU VERITAS. Pipe Vibration Awareness. 2010. Boletín de entrenamiento.

Figura 34 Causa de la fatiga



Fuente: Bureau Veritas

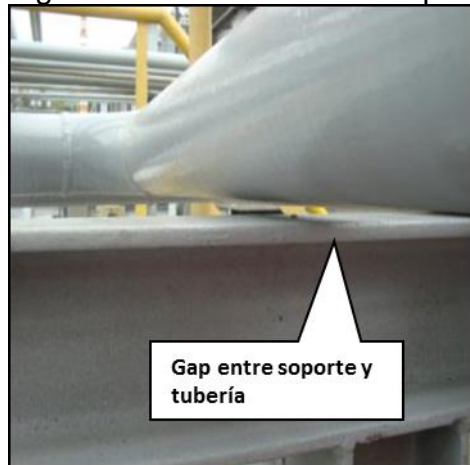
### 3.3.2 Resolviendo el Problema

#### Donde se debe buscar:

- Equipos Reciprocantes (Bombas, Motores y Compresores)
- Espacios (Air gap) entre la Tubería y el apoyo
- Cambios de Flujo: Altos flujos, RO
- Cambios de Presión

#### Que buscar:

Figura 35 Tubería con Air Gap



Fuente: Ponencia CBM Estructural ACIEM

Figura 36 Tubería en Cantiléver



Fuente: Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Failure in Process Pipework

Figura 37 Piernas Muertas



Fuente: Ponencia CBM Estructural ACIEM

### 3.3.3 Ejemplos de Correcciones

Figura 38 Tuberías sin soporte 1



Fuente: Ponencia CBM Estructural ACIEM

Figura 39 Corrección Tuberías sin soporte 2



Fuente: Ponencia CBM Estructural ACIEM

Figura 40 Corrección Tuberías sin soporte 3



Fuente: Ponencia CBM Estructural ACIEM

### 3.4 INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

El objetivo de la ingeniería de Confiabilidad es Utilizar los fundamentos de confiabilidad, aplicando los conceptos de probabilidad, análisis de causas de fallas y análisis estadísticos para optimizar las estrategias de mantenimiento y mejorar resultados en producción

¿QUÉ SE ENTIENDE POR FALLA? En términos de mantenimiento, de acuerdo a la Norma ISO 14224<sup>11</sup>, se puede decir que una **falla** es la terminación de la capacidad de un elemento para realizar una función requerida.

#### 3.4.1 Definiciones de Ingeniería de Confiabilidad:

- Confiabilidad  $R(t)$ : se define como la probabilidad de que un equipo cumpla una misión específica (no falle) bajo condiciones de operación determinadas en un período determinado. La Confiabilidad se relaciona básicamente con la tasa de fallas (cantidad de fallas) y con el tiempo medio operativo (TPO -tiempo promedio operativo). Mientras el número de fallas de un determinado equipo vaya en aumento o mientras el TPO de un equipo disminuya, la Confiabilidad del mismo será menor.
- Disponibilidad (A): es una característica que resume cuantitativamente el perfil de operatividad de un elemento. Representa el porcentaje del tiempo disponible (de uso) del activo en un período determinado). Es una medida importante para estimar el factor de utilización de un activo. La disponibilidad relaciona básicamente los tiempos promedios fuera de servicio (TPFS) y los tiempos promedios operativos (TPO).
- Mantenibilidad  $M(t)$ : Es la característica inherente de un activo, asociada a su capacidad de ser recuperado para el servicio (programada/ no programada) a partir de la ejecución de tareas de mantenimiento. En la práctica, se puede expresar en términos de factores de: frecuencia de mantenimiento, tiempo empleado en mantenimiento y costos de mantenimiento. El parámetro fundamental para calcular la mantenibilidad lo constituye el tiempo promedio de reparación (MTTR) de las fallas.

#### 3.4.2 Análisis Estadístico de Datos

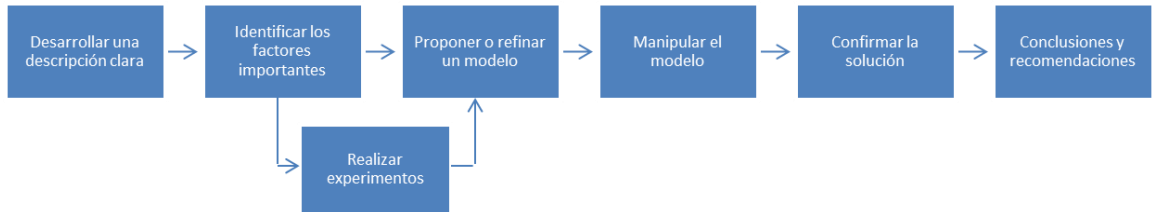
##### CONCEPTOS DE BÁSICOS ESTADÍSTICA:

La Estadística es la rama de las matemáticas que se ocupa de reunir, organizar y analizar datos numéricos y que ayuda a resolver problemas como el diseño de experimentos y la toma de decisiones<sup>12</sup>.

---

<sup>11</sup> ISO 14224 Petroleum, petrochemical and natural gas industries -- Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.2005.

Figura 41 El método de ingeniería.



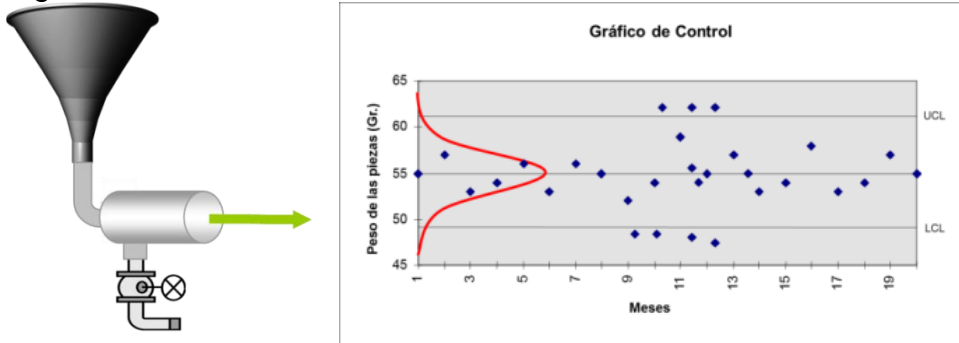
Fuente: Probabilidad y Estadística aplicada a la Ingeniería MONTGOMERY y RUNGER<sup>13</sup>.

Se divide en dos fases:

**Estadística descriptiva:** Es la fase de descripción, organización, síntesis y análisis de la información de interés pero sin llegar a conclusiones fuertes o profundas sobre la misma; es más, una fase de recolección y organización de información para su examen cuidadoso, y

**Estadística Inferencial:** Esta fase busca obtener conclusiones sólidas y más profundas que una simple descripción de la información, basados en el trabajo con muestras y su posterior generalización de resultados para la toma de decisiones y conclusiones sólidas.

Figura 42 Entendiendo la variabilidad



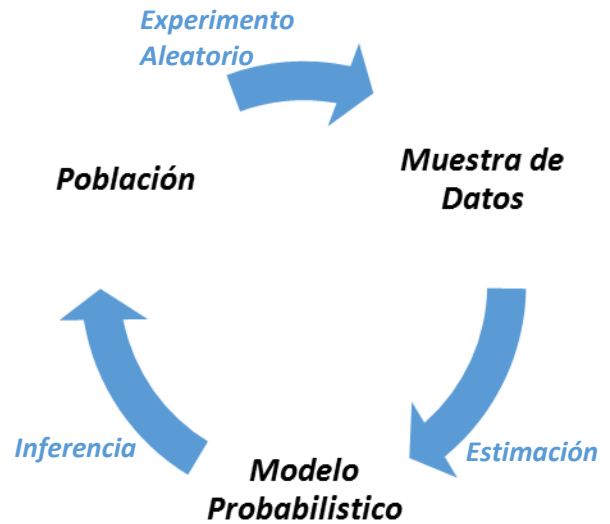
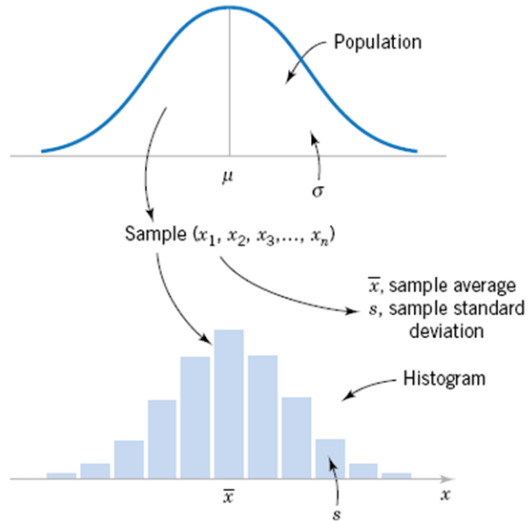
Fuente: Los Autores

Los métodos de análisis estadístico se utilizan para describir y entender la variabilidad. La pregunta es ¿Qué es Variabilidad? Por variabilidad se entiende que observaciones sucesivas de un sistema o fenómeno no producen el mismo resultado.

12 MONTGOMERY, Douglas C. y RUNGER, George C. Probabilidad y Estadística aplicada a la Ingeniería. 1ra Edición. México McGraw-Hill, 1994. 1014 p.

13 MONTGOMERY, Douglas C. .1b2d.

Figura 43 Inferencia Estadística

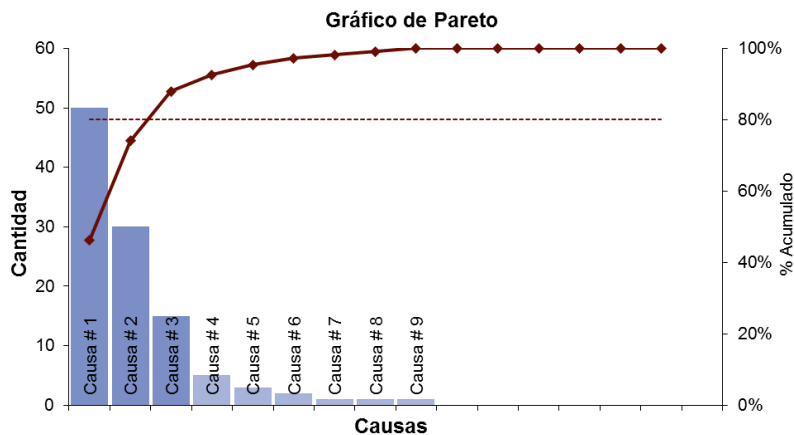


Fuente: Probabilidad y Estadística aplicada a la ingeniería Montgomery

### 3.4.3 Análisis De Pareto

Wilfried Fritz Pareto (15-jun-1848 – 19-ago-1923), fue un sociólogo, economista y filósofo italiano que enunció el principio basándose en el denominado conocimiento empírico. Estudió que la gente en su sociedad se dividía naturalmente entre los «pocos de mucho» y los «muchos de poco» o ley del 80-20, es decir que 20 % de población, ostentaba el 80 % de la riqueza. Este principio se ha aplicado con éxito a los ámbitos de la Política, Economía y Mantenimiento.

Figura 44 Gráfico de Pareto



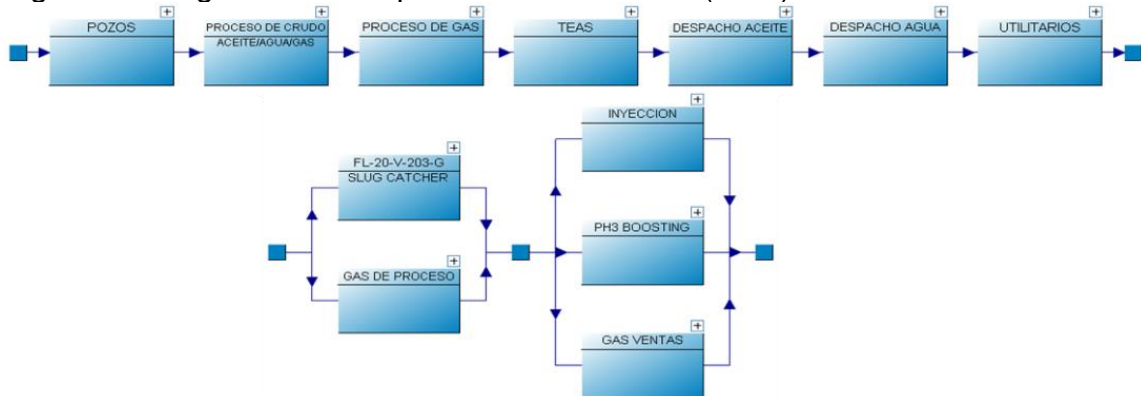
Fuente: Los Autores

### 3.4.4 Análisis RAMS

El Análisis RAMS es la sigla formada de Reliability, Availability, Maintainability System (Análisis de Sistemas de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad en español) es una metodología en la cual se desarrollan diagramas de bloques de confiabilidad (RBD) de las facilidades.

Se realizan simulaciones de Monte Carlo de acuerdo a modelos de falla establecidos, para pronosticar límites de capacidad, disponibilidad e identificar componentes que tienen mayor impacto. Para realizar estas simulaciones se utilizan software con capacidad para configurar y resolver modelos por diagramas de bloques de confiabilidad.

Figura 45 Diagrama de Bloques de Confiabilidad (RBD)

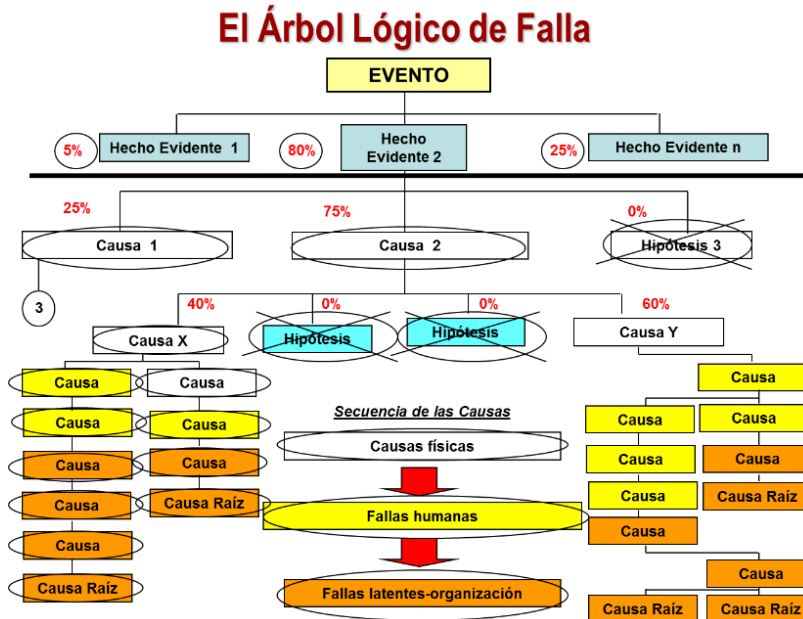


Fuente: EQUION

### 3.4.5 Análisis de Causa Raíz (RCA):

El RCA es un riguroso método o técnica de análisis y solución de problemas mediante el análisis de eventos, bajando hasta las causas raíces del sistema, es decir, a las deficiencias en la organización, normas y culturas que permiten que un evento ocurra, este análisis permite eliminar las causas en el sistema, en lugar de corregir los síntomas, contribuyendo con la eliminación de la recurrencia de la falla o minimizar la probabilidad del riesgo a lo máximo posible. De acuerdo a ISO 14224 “es el análisis de las circunstancias asociadas con el diseño, fabricación, instalación, uso y mantenimiento que han dado lugar a una falla”. Dependiendo de las características de la falla en cuanto a la severidad, se determina qué tipo de análisis a realizar y el nivel de detalle requerido.

Figura 46 El Árbol Lógico de Falla



### 3.5 SEGURIDAD DE PROCESOS

#### 3.5.1 Conceptos- Definiciones Seguridad de Proceso

¿Qué es seguridad de Procesos? Son los lineamientos o requerimientos establecidos por la organización de manera disciplinada, que integra los sistemas operativos y administrativos, a través de la aplicación de buenas prácticas de seguridad de procesos, ingeniería, integridad de activos y confiabilidad.

¿Cuál es el Objetivo? Prevenir y controlar accidentes catastróficos, asociados a la manipulación de productos químicos explosivos, inflamables o tóxicos derivados de procesos de la industria química o petrolera.

¿Cuáles son las características de un evento de Seguridad de procesos? Incidente Seguridad de Proceso (PSI - Según API-754), Un incidente de seguridad de proceso debe cumplir los cuatro criterios siguientes: Proceso involucrado, Por encima del umbral mínimo reportable, Ubicación, Emisión súbita.

INCIDENTE<sup>14</sup>: Un evento inusual o inesperado, el cual resulta o tiene el potencial de resultar en:

- Lesiones serias a las personas (inclusive muerte).
- Daño significativo a la propiedad.

<sup>14</sup> CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. Guidelines for Investigating Chemical Process Incidents. New York 2003, p 433

- Impacto adverso al medio ambiente o
- Una interrupción mayor al proceso.

Los incidentes se clasifican en 3 categorías:

- Accidentes.
- Casi accidentes
- Interrupción operacional

Figura 47 Incidente Seguridad de Proceso



Fuente: Guidelines for Investigating Chemical Process Incidents

**ACCIDENTE:** Un evento en el que se producen lesiones a las personas (inclusive muerte), daño a la propiedad (incluso pérdida de materiales) o impacto adverso al medio ambiente.

De acuerdo al API RP 754 Indicadores de desempeño de seguridad de proceso para las industrias de refinación y petroquímicas:

3.1.17 Pérdida De Contención Primaria (Loss Of Primary Containment LOPC)  
(Pág. 5)

Imprevista o incontrolada liberación de cualquier material de contención primaria, incluyendo materiales incombustibles y no tóxico (por ejemplo, vapor, condensado caliente, nitrógeno, comprimido CO<sub>2</sub> o aire comprimido).

3.1.24 Seguridad de Proceso (Pág. 5)

Un marco disciplinado para administrar la integridad de los sistemas operativos peligrosos y procesos mediante la aplicación de los principios de buen diseño, ingeniería y prácticas de operación y mantenimiento.

3.1.25 Evento de seguridad de proceso PSE (Pág. 6)

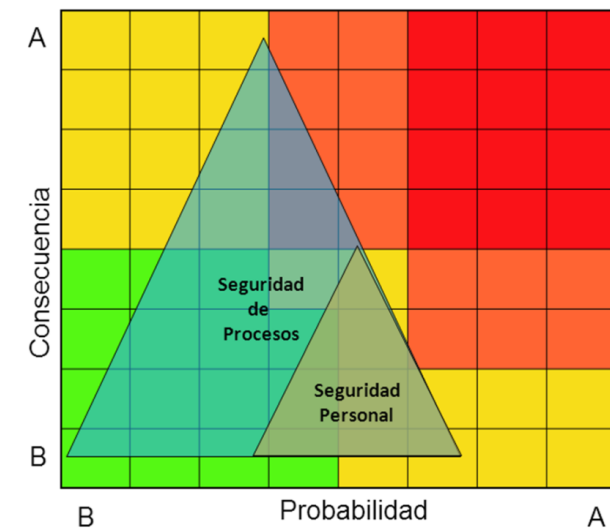
Un imprevisto o incontrolada LOPC de cualquier material, incluyendo materiales no tóxicos y no inflamables (por ejemplo, vapor, condensado caliente, nitrógeno, comprimido CO<sub>2</sub> o aire comprimido) desde un proceso o un evento no deseado o

condición que, bajo circunstancias ligeramente diferentes, podría haber resultado en LOPC de un material.

### 3.5.2 Seguridad de Proceso vs Seguridad de las Personas

De acuerdo a las definiciones de seguridad de proceso, los eventos tienden a ser catastróficos, de ahí la importancia de prevención.

Figura 48 Triángulos de la Seguridad



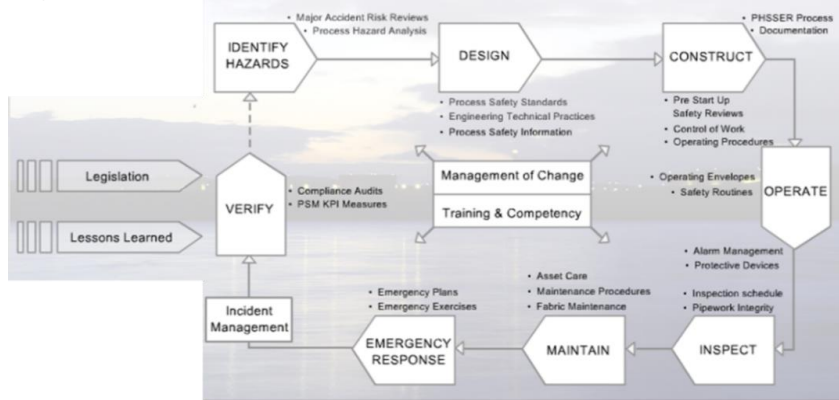
Fuente: EQUION

### 3.5.3 Diagrama de Barreras

Es un esquema que permite mostrar las diferentes “Barreras”, estas barreras son todas las estrategias desarrolladas para evitar la ocurrencia de un Incidente de Seguridad de Proceso.

Estas barreras son colocadas desde el diseño y acompañan al activo hasta la disposición final.

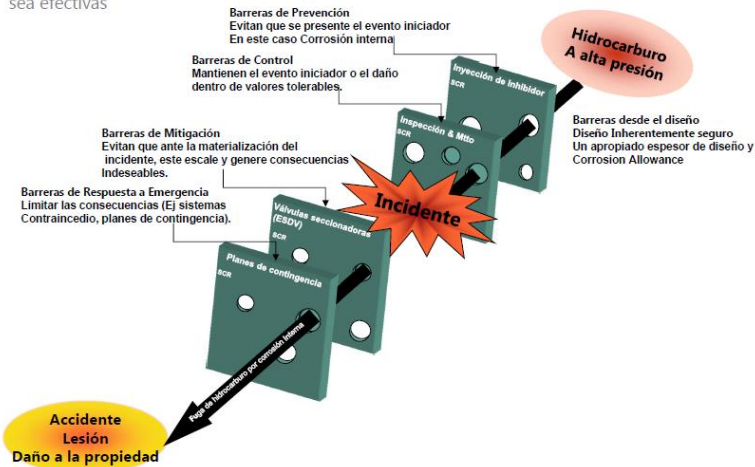
Figura 49 Modelo Ciclo de Vida Seguridad de Proceso



Fuente: BP Process Safety Training

**Tipos de barreras:** Barreras de Prevención, Barreras de Control, Barreras de Mitigación y Barreras de Respuesta a Emergencia  
 Figura 50 Diagrama de Barreras

**OBJETO:** Garantizar que las barreras contra las amenazas esten en sitio, esten operando y sea efectivas



Fuente: EQUION

## 4 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE PRIORIZACIÓN

### 4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La metodología actual para priorizar las intervenciones de mantenimientos de los equipos mayores de la operación de Equion en Casanare no tiene en cuenta los impactos en la producción. Actualmente se disparan las rutinas de mantenimiento basadas en tiempo y se realiza la solicitud a operaciones quienes por manejo del campo entregan los equipos a discreción del supervisor de operaciones.

A continuación se desarrolla una evaluación del comportamiento de las fallas de los equipos principales de la operación EQUION en Casanare, y se genera un estatus con la condición de los componentes críticos de la maquinaria

### 4.2 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS FALLAS

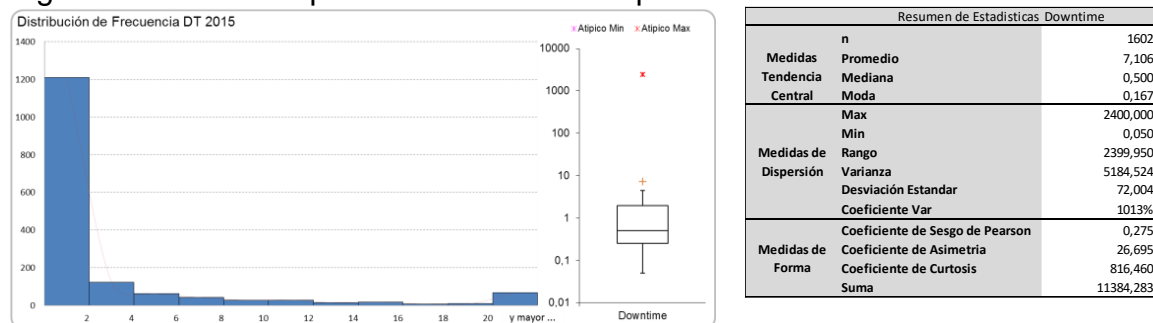
Para el análisis estadístico de los datos y presentar el análisis exploratorio inicialmente se define la variable a analizar, en este caso Down Time (Tiempo de Parada), que se calcula usando los registros de paradas y arranques de los Equipos. El análisis exploratorio de datos es el resultado de las estadísticas y gráficas elaboradas con los datos y contiene: La distribución de frecuencias, un diagrama de caja, el resumen de estadísticas y una interpretación de los resultados.

Tabla 3 Equipos Atípicos

<b>FL-C6-P&gt;-0002B</b> 23/10/2015 352 hrs.	<b>FL-21-P&gt;-302C</b> 16/02/2015 312 hrs.	<b>FL-21-P-303B</b> 16/03/2015 2400 hrs.
<b>FL-21-P-303B</b> 17/09/2015 782 hrs.	<b>FL-26-ME&gt;-301D</b> 10/04/2015 11:30 270 hrs.	<b>RC-G&gt;-8001A</b> 12/05/2015 10:30 1190 hrs.

*Nota: Como estos eventos por su duración en impacto son analizados con la metodología RCA no se tienen en cuenta en el presente análisis.*

Figura 51 Análisis Exploratorio Downtime Equion



*Se puede decir que Downtime en Hrs es Heterogéneo, tiene Promedio = 7,11 Hrs y Desviación Estándar = 72 Hrs, Sesgo a Derecha, bigote inferior menor que el superior, Asimetría Positiva, Alta concentración de valores (Leptocúrtica), 254 datos atípicos superiores y en el Intervalo (0-2) Hrs, se maximiza la distribución con el 76% de la muestra, (1210 observaciones)*

Fuente: Los Autores

### **Resultados Generales:**

- El Down Time Promedio es de 7,1 hrs.
- El 75% de las paradas de los Equipos tiene una duración menor a 1.91 hrs
- El 20% de las paradas de los Equipos se encuentran en el intervalo (1.91 hrs. - 16.1 hrs.).
- El 0.37% de las paradas tiene duración mayor a 200 hrs. equivalen a 6 Eventos de paradas atípicas extremas mayores a 200 hrs.
- Revisando la información de cada evento, las causas de falla identificadas para los eventos menores a 2 hrs, generalmente están relacionadas con Instrumentación & Control como son: Sensores, Indicadores, ajustes de Instrumentos, fallas de Tubing...
- Las causas de fallas para eventos mayores a 2 hrs, están relacionadas a fallas de: culatas, pistones, Cojinetes y para el compresor fallas de: válvulas compresoras, anillos, empaquetaduras, Cojinetes, crucetas y el aceite lubricante.

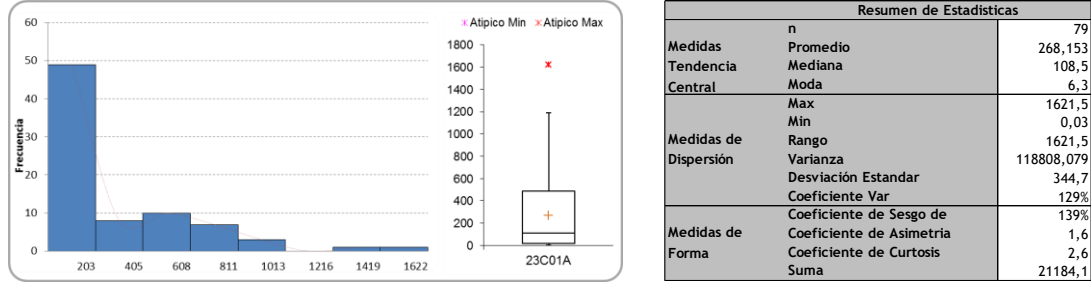
Para entender las fallas se evalúa el desempeño en los índices de desempeño de los equipos Confiabilidad (R), Disponibilidad (A) y Mantenibilidad (M).

#### **4.2.1 Análisis tiempo entre fallas Confiabilidad (R)**

Para estimar la confiabilidad de los Equipos Principales, es necesario evaluar la distribución de probabilidad del tiempo entre fallas (TBF Time Between Failure) de los equipos, para ello se toman los registros de paradas de los Equipos.

Se desarrollan análisis exploratorios a todos los TBF de los equipos, a continuación se muestra el análisis exploratorio de la unidad FL-23-C>-01A, del CPF de Floreña, se realizaron análisis similares para las otras unidades, observando comportamientos similares.

Figura 52 Análisis Exploratorio TBF 23C01A



Se puede decir que la distribución de frecuencias del tiempo entre fallas de la unidad 23C01A en Hrs presenta asimetría positiva y sesgo a Derecha confirmado con la forma del histograma y diagrama de caja donde el bigote inferior es menor que el superior, la población es Heterogenea, con promedio igual a 268,15 Hrs. y Desviación Estandar igual a 344,69 Hrs., Alta concentración de valores (Leptocúrtica), 2 datos atípicos superiores y en el Intervalo (0-202,7) Hrs., se maximiza la distribución con el 62% de la muestra, (49 observaciones).

Fuente: Los Autores

Finalizado el análisis exploratorio, se procede a realizar la prueba de bondad de ajuste, para determinar la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los datos. Se asigna nombre a la variable aleatoria, sea  $t = \text{tiempo entre fallas de la unidad 23C01A}$  y teniendo en cuenta el origen de los datos, los resultados del análisis exploratorio y los gráficos, se establece la hipótesis que la población se distribuye Gamma con parámetros de forma  $\alpha$  y de escala  $\theta$ .

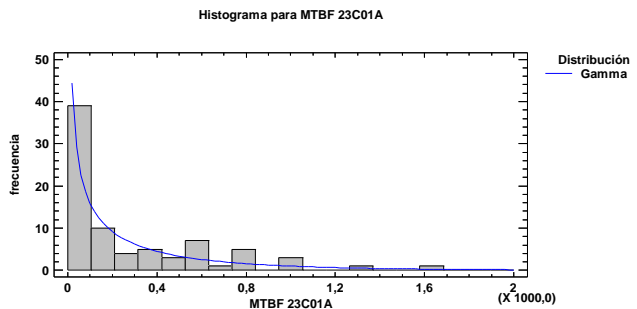
Se tienen como hipótesis:

Ho: que t proviene de una población con distribución gamma.

Ha: que t no proviene de una población con distribución gamma.

Tabla 4 Pruebas de Bondad-de-Ajuste (Kolmogorov-Smirnov) para MTBF 23C01A

	Gamma
DMAS	0,095786
DMENOS	0,0838842
DN	0,095786
Valor-P	0,472337



Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que MTBF 23C01A proviene de una distribución gamma con 95% de confianza.

Fuente: Software statgraphics Centurion Trial version- [www.statgraphics.net](http://www.statgraphics.net)

Como no se puede rechazar  $H_0$ , entonces se puede afirmar que  $t$  tiene una distribución gamma<sup>15</sup> y su función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(t; \alpha, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\alpha)\theta^\alpha} t^{(\alpha-1)} e^{-\frac{t}{\theta}}, t > 0, \alpha, \theta > 0 \\ 0 & \text{en cualquier otro valor.} \end{cases}$$

Se hace ajuste por el método de momentos a los parámetros distribucionales (de forma  $\alpha$  y de escala  $\theta$ )

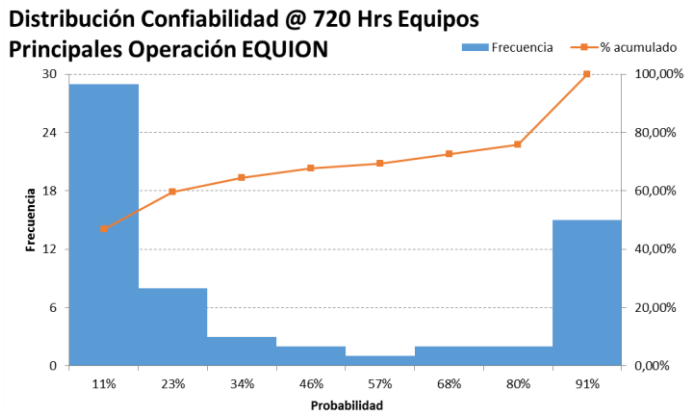
$$\begin{aligned} E(t) &= \mu \\ \mu &= \alpha\theta \\ \text{Por lo tanto: } Var(t) &= \sigma^2 \text{ y como } \hat{\mu} = \bar{x} \text{ \& } \hat{\sigma}^2 = S^2 \text{ Entonces} \\ \sigma^2 &= \alpha\theta^2 \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x} = \hat{\alpha} \hat{\theta} \Rightarrow \hat{\alpha} = \frac{\bar{x}}{\hat{\theta}} \\ S^2 = \hat{\alpha} \hat{\theta}^2 \Rightarrow \hat{\alpha} = \frac{S^2}{\hat{\theta}^2} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\bar{x}}{\hat{\theta}} = \frac{S^2}{\hat{\theta}^2} \Rightarrow \bar{x} = \frac{S^2}{\hat{\theta}} \text{ De hay } \Rightarrow \hat{\theta} = \frac{S^2}{\bar{x}} \\ \Rightarrow \hat{\alpha} = \frac{\bar{x}}{\hat{\theta}}$$

Con los parámetros estimados se estima la Confiabilidad (Probabilidad de Supervivencia) es calculada de acuerdo a los parámetros de forma y de escala bajo una distribución Gamma acumulativa para cada equipo. Se puede concluir que aproximadamente el 65% de los equipos tiene una confiabilidad@ 720 hrs. menor a 34%.

15 CANAVOS, George C. Probabilidad y Estadística Aplicaciones y Métodos. España. McGraw-Hill. 1984 P. 152.

Figura 53 Comportamiento de la Confiabilidad @ 720 hrs.



Fuente: Los Autores

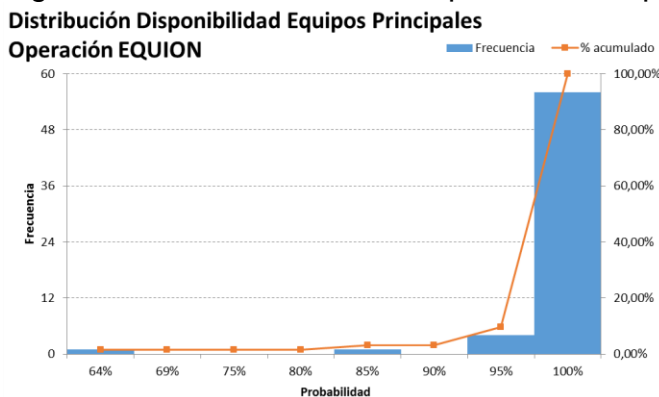
#### 4.2.2 Análisis de disponibilidad (A)

Como se dijo anteriormente la Disponibilidad es una medida de qué tan frecuente el sistema está bien y listo para operar y es frecuentemente expresada como una relación entre el tiempo de parada y el tiempo en servicio así:  

$$Disponibilidad (A) = \frac{Tiempo\ en\ Servicio + Tiempo\ de\ Parada}{Tiempo\ de\ Servicio}$$
 Con el tiempo en servicio y el tiempo de parada de cada equipo se procede a estimar la disponibilidad de los Equipos.

Se puede concluir que aproximadamente el 5% de los equipos tiene una Disponibilidad menor al 95%.

Figura 54 Distribución de la Disponibilidad Equipos Principales

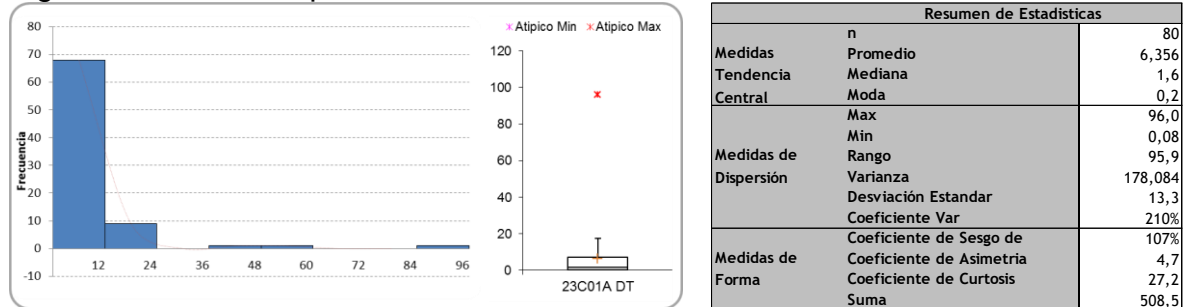


Fuente: Los Autores

### 4.2.3 Análisis tiempo de reparación Mantenibilidad (M)

De igual manera como en el numeral anterior se procede al análisis de los Tiempos de Reparación de un equipo, denominándolo DT 23-C-01A.

Figura 55 Análisis Exploratorio DT 23C01A



Se puede decir que que la distribución de frecuencias del tiempo de reparación 23C01A DT en Hrs, presenta asimetría positiva y sesgo a Derecha confirmado con la forma del histograma y diagrama de caja donde el bigote inferior es menor que el superior, la población es Heterogenea con Promedio = 6,36 Hrs. y Desviación Estandar = 13,34 Hrs., Alta concentración de valores (Leptocúrtica), 8 datos atipicos superiores y en el Intervalo (0,1-12,1) Hrs., se maximiza la distribución con el 85% de la muestra, (68 observaciones).

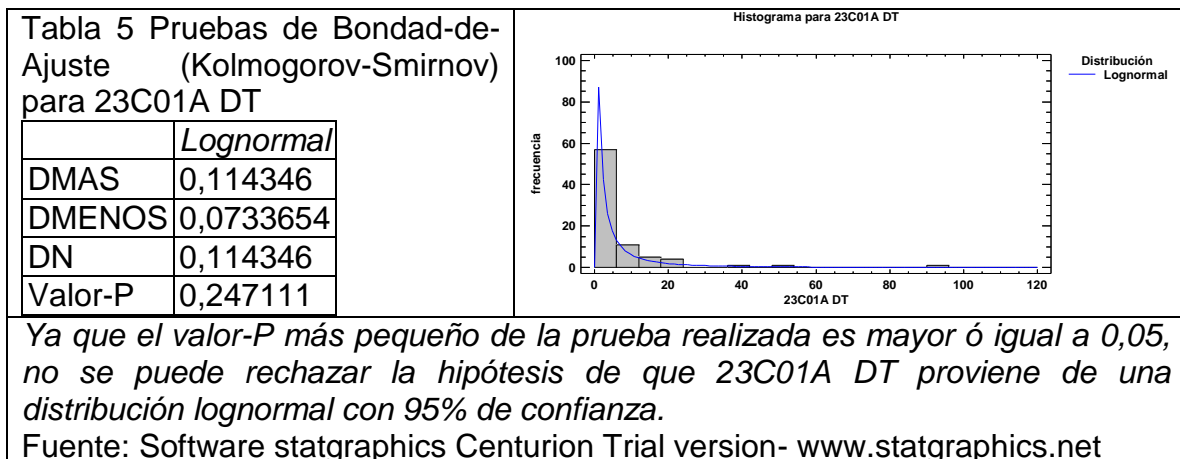
Fuente: Los Autores

La distribución Lognormal se ajusta a ciertos tipos de falla, datos de reparación y puede ser una buena representación de la distribución de los tiempos de reparación.

Se tiene como hipótesis:

Ho: que los datos FL-23-C>-01A provienen de una población con distribución Log-normal.

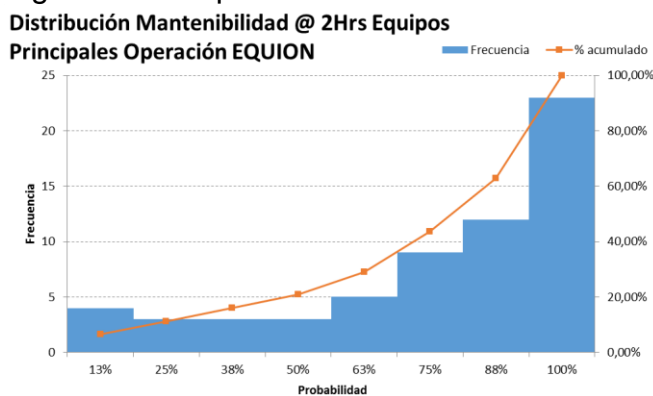
Ha: que los datos FL-23-C>-01A no provienen de una población con distribución Log-normal.



Con los parámetros estimados se estima la Mantenibilidad es calculada de acuerdo a los parámetros de forma y de escala bajo una distribución LogNormal acumulativa para cada equipo.

Se puede concluir que aproximadamente el 20% de los equipos tiene una Mantenibilidad @ 2hrs. menor al 50%.

Figura 56 Comportamiento de la Mantenibilidad @ 2 Hrs.



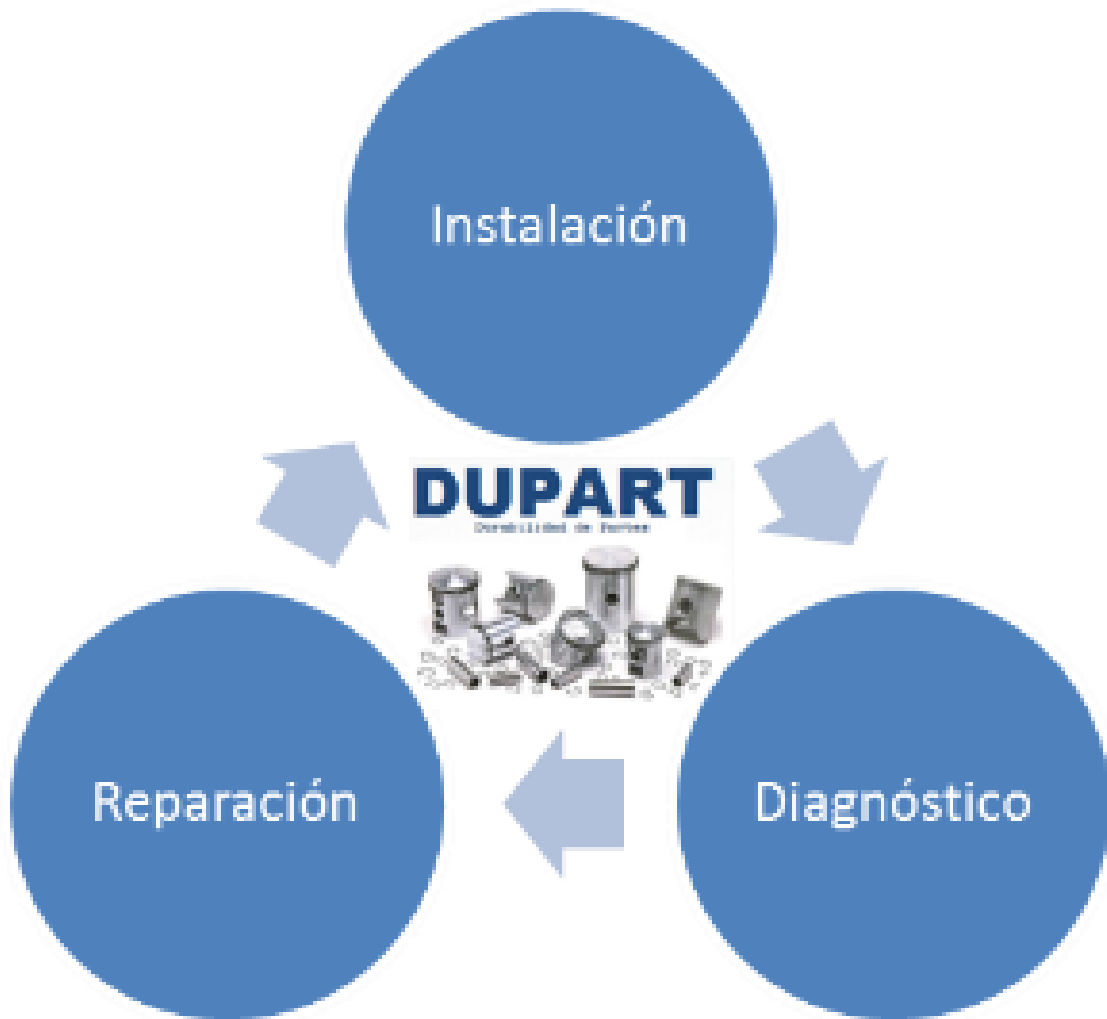
Fuente: Los Autores

A continuación, para generar el estatus con la condición de los componentes críticos de la maquinaria.

### 4.3 ESTATUS DE CONDICIÓN DE LOS COMPONENTES CRÍTICOS

Para establecer el estatus de condición de los componentes críticos de la maquinaria se utiliza DUPART (Durabilidad de Partes). DUPART tiene como objetivo optimizar la vida de los componentes, evaluando la durabilidad, como el tiempo desde la instalación hasta que falla o se cambia en los equipos críticos de la maquinaria recíprocante. Esta herramienta desarrollada para asegurar el proceso de reparación de componentes,

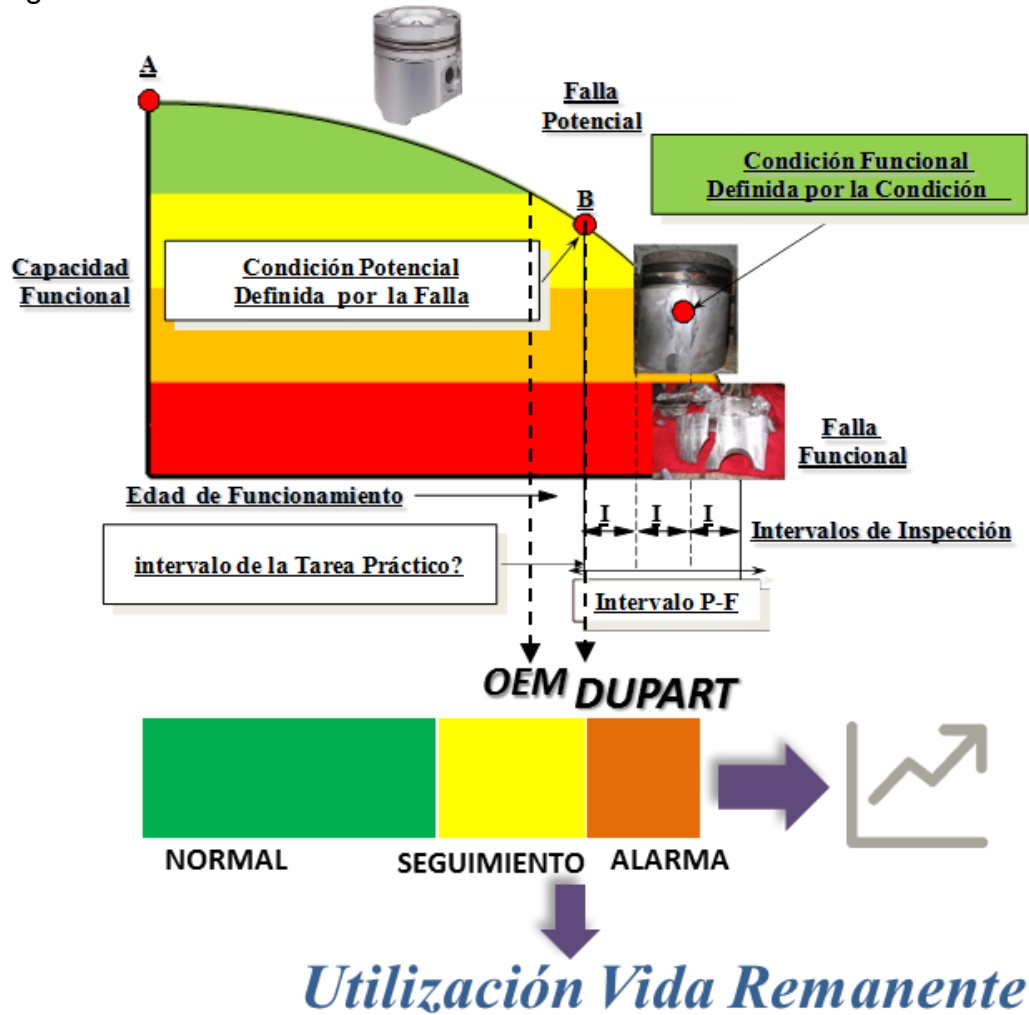
Figura 57 Proceso DUPART



Fuente: Los Autores

Como la condición de los componentes es evaluada por el equipo de PdM, hay una interacción entre las dos variables.

Figura 58 Interacción PdM - DUPART



Fuente: Los Autores

La utilización de vida remanente de los componentes tiene como beneficio la Reducción de:

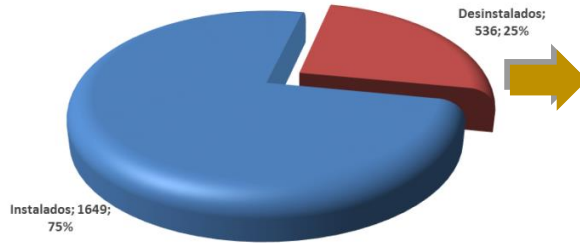
- pérdidas de Producción.
- Reducción de Costos de Repuestos
- Reducción utilización HH

#### 4.3.1 Estado de componentes DUPART

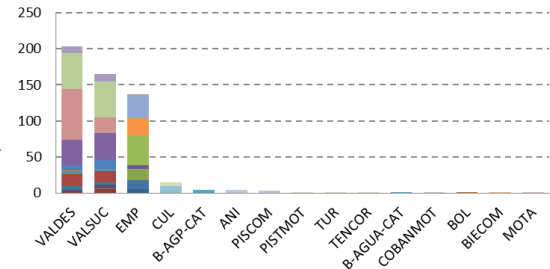
Actualmente en la herramienta Dupart tiene registrado 2185 con el siguiente distribución

Figura 59 Interacción PdM - DUPART

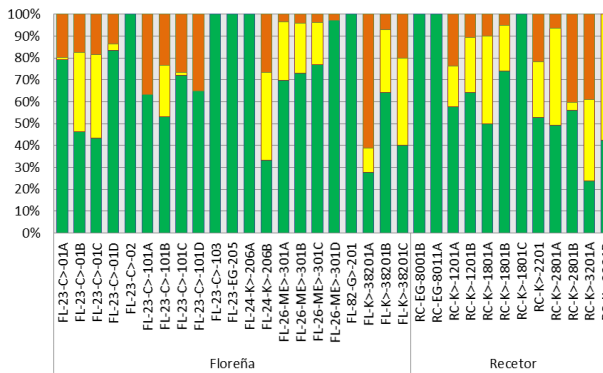
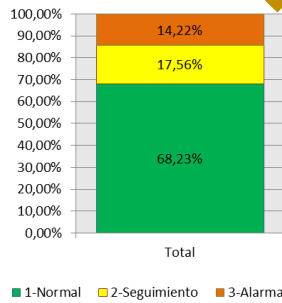
Componentes Registrados en Dupart



Componentes Desinstalados Dupart

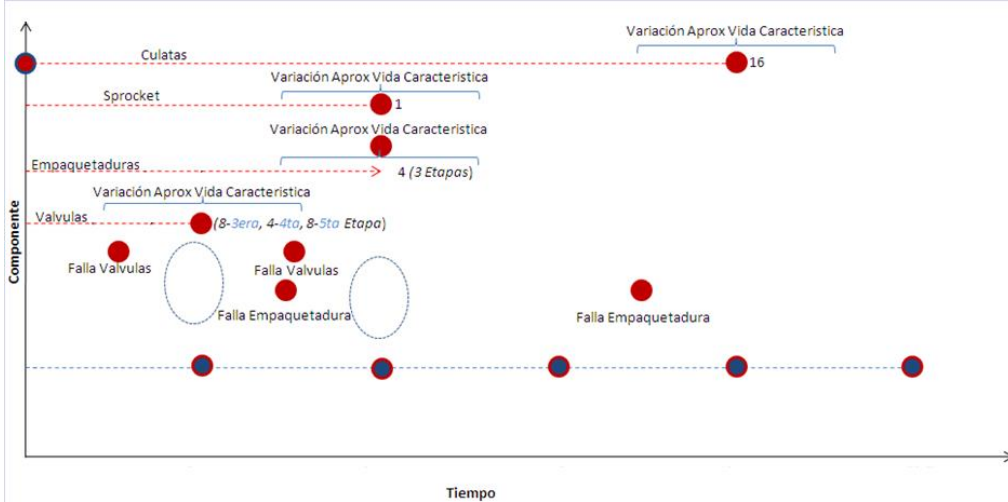


Estado Actual Componentes Dupart



Fuente: Los Autores

Figura 60 Variación Vida característica de los componentes

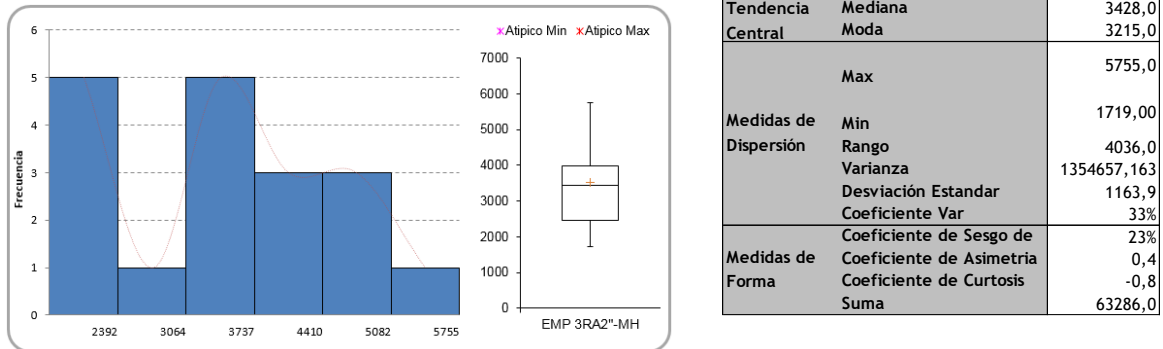


Fuente: EQUION

### 4.3.2 Análisis estadístico durabilidad de partes

De los componentes críticos instalados en los equipos que se les registra la durabilidad se seleccionó TIPO COMPONENTE: *EMP 3RA2"-MH*

Figura 61 Análisis Exploratorio EMP 3RA 2"-MH



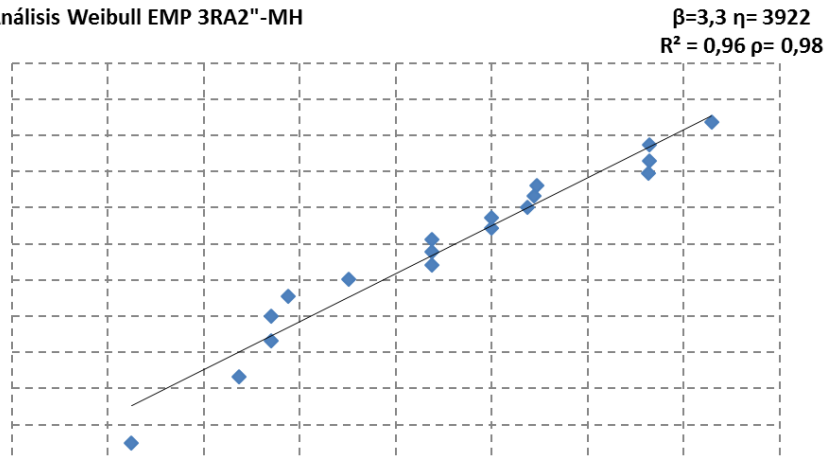
Se puede decir que EMP 3RA2"-MH en Hrs. es Heterogéneo, tiene Promedio = 3515,89 Hrs. y Desviación Estandar = 1163,9 Hrs., Sesgo a Derecha, bigote inferior menor que el superior, Asimetría positiva leve, Baja concentración de valores (platicúrtica) y en el Intervalo (1718,9-2391,6) Hrs., se maximiza la distribución con el 28% de la muestra, (5 observaciones).

Fuente: Los Autores

Se procede a hacer el análisis Weibull de los datos para estimar la vida característica de los componentes y la probabilidad de falla.

Figura 62 Análisis Weibull Empaquetaduras

Análisis Weibull EMP 3RA2"-MH



Parametros Distribución Weibull	
BETHA	3,3
ETHA	3922
Coefficiente de Correlación (p)	98%
Coefficiente de Determinación	96%

Fuente: Los Autores

Tabla 6 STATUS DE CONDICIÓN DE LOS COMPONENTES CRÍTICOS DE LA MAQUINARIA

Tipo_comp_transc	sub_tipo_comp_transc	Cantidad	Confiabilidad	Estado
ANI	-MH64	4	1%	Analizar
B-AGP-CAT	3608	4	0%	Analizar
CUL	W-L7044	6	11%	Analizar
EMP	1RA2"1/4-MH	5	59%	Ok
EMP	1RAWH66	13	16%	Analizar
EMP	2"1/2-BOOSTING-RC	15	5%	Analizar
EMP	2DA2"1/4-MH	5	24%	Analizar
EMP	2DAWH66	41	17%	Analizar
EMP	3RA2"1/4-MH	22	60%	Ok
EMP	3RA2"-MH	31	54%	Ok
VALDES	1RA-MH	5	28%	Analizar
VALDES	1RA-WH66	16	7%	Analizar
VALDES	2DA-ARIEL-KVU6	4	0%	Analizar
VALDES	2DA-MH	7	11%	Analizar
VALDES	2DA-WH66	35	7%	Analizar
VALDES	3RA-ARIEL-KVU6	70	0%	Analizar
VALDES	3RA-MH	48	47%	Ok
VALDES	8"BOOSTING-RC	9	6%	Analizar
VALSUC	1RA-ARIEL-KVU6	5	15%	Analizar
VALSUC	1RA-B-FL-8"3/8	6	3%	Analizar
VALSUC	1RA-WH66	15	8%	Analizar
VALSUC	2DA-MH	13	31%	Analizar
VALSUC	2DA-WH66	37	9%	Analizar
VALSUC	3RA-ARIEL-KVU6	22	2%	Analizar
VALSUC	3RA-MH	50	48%	Ok
VALSUC	8"BOOSTING-RC	10	8%	Analizar

Los límites de clasificación de la confiabilidad de los componentes son:

Ok	100%-36,8%	Se utiliza como límite Estimador de $\eta$
Analizar	<36,8%	Realizar análisis de las fallas. Causas comunes y planes de acción.

A continuación, se establece la metodología de evaluación de la confiabilidad, condición e impactos en la producción que se denomina metodología de evaluación del riesgo.

#### 4.4 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL RIESGO

Esta metodología se fundamenta en los principios del mantenimiento, que buscan asegurar que los equipos desempeñen las funciones para las cuales fueron instalados, manteniendo el balance de la estrategia de mantenimiento y asegurar que los componentes de los equipos se utilicen al máximo.

Figura 63 Proceso Metodología de Priorización



Fuente: EQUION

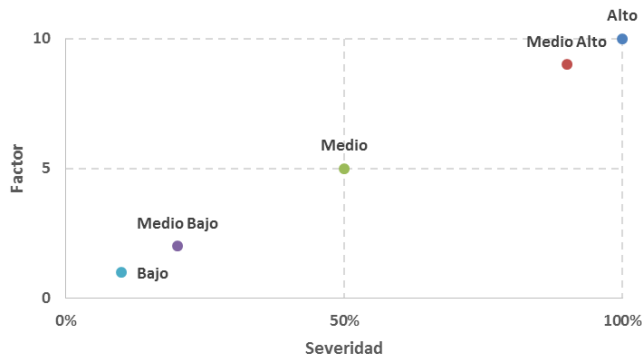
Aprovechando la información histórica disponible, se evalúan tres variables principales para estimar la probabilidad de Falla de los Equipos: el cumplimiento de la estrategia de mantenimiento, la evaluación de la condición de los equipos, el desempeño del índice RAM y las pérdidas de Producción. La distribución porcentual se hace en una reunión multidisciplinaria con participación de los participantes del proceso: Planeación, Ejecución, Autoridades Técnicas, Predictivo & Confiabilidad.

Estimación Probabilidad de Falla	Estrategia de Mantenimiento <b>OEM -CMS</b> OVH, TOP OVH, Preventivos
	Mantenimiento Predictivo <b>PdM</b> Niveles de vibración, Condición de aceite y V Oper. Operacionales
	Índice <b>RAM</b> Tasa de Falla, Tiempos de Reparación, Disponibilidad
Variable de Impacto	Pérdidas de Producción: Pérdidas NP & Pérdidas P

La asignación del Factor de Criticidad de las variables se hace valorando como alto, medio alto, medio, medio bajo y bajo los impactos y con asignaciones de 10, 9, 5, 1 y 0 respectivamente.

Figura 64 Factor de Criticidad

Factores de Criticidad



Fuente: STORK

Para la estimación del valor de probabilidad se planteó la siguiente Ecuación:

$$\begin{array}{l}
 \text{Probabilidad de} \\
 \text{Falla} =
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \textit{Estrategia de} \\
 \textit{Mantenimiento}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \textit{Índice de Condición} \\
 \textit{RAM}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \\
 \textit{Índice RAM}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 = \\
 =
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 xx\% * \textit{Factor de Criticidad} \\
 +xx\% * \textit{Factor de Criticidad} \\
 +xx\% * \textit{Factor de Criticidad}
 \end{array}$$

A continuación, se hace una revisión de cada una de las variables, mostrando los resultados generales para la estimación de la probabilidad de falla.

#### 4.4.1 Cumplimiento de estrategia de mantenimiento

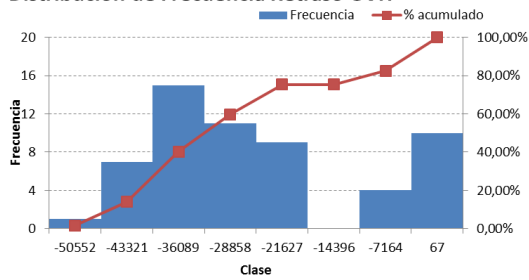
De la estrategia de mantenimiento cargada en el CMMS, para los equipos críticos se identifican dos tipos de mantenimientos preventivos: los mantenimientos preventivos mayores y los preventivos periódicos.

Para evaluar el estado del cumplimiento de la estrategia de mantenimiento, se usan las horas desde la última ejecución de cada mantenimiento, luego se estima la siguiente intervención de mantenimiento y posteriormente se calcula la diferencia con las horas de servicio actuales y a este resultado se le asigna un puntaje a equipo.

- Mantenimiento Mayores: Overhaul (MOVH) & Top Overhaul (TOVH)

Figura 65 Factor de Criticidad MOVH

Distribución de Frecuencia Retraso OVH

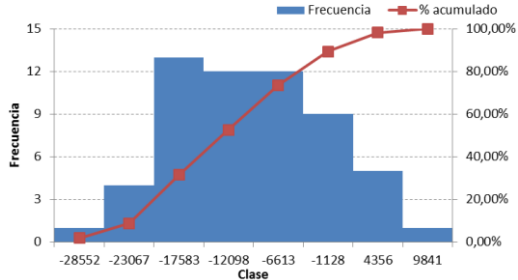


<b>Puntaje</b>	0	5	8	10

Fuente: Los Autores

Figura 66 Factor de Criticidad TOP OVH

Distribución de Frecuencia Retraso TOP OVH



<b>Puntaje</b>	0	5	8	10

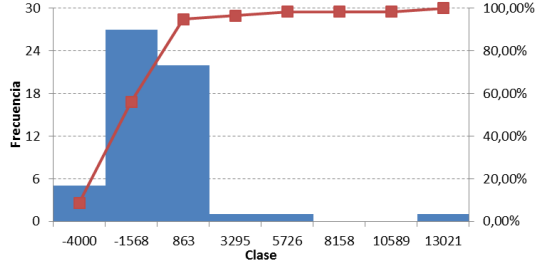
Fuente: Los Autores

- Mantenimientos Preventivos Periódicos.

Figura 67 Factor de Criticidad Mantenimientos Preventivos

Distribución de Frecuencia Retraso

Mantto Preventivo Periódico



<b>Puntaje</b>	0	5	8	10

Fuente: Los Autores

A continuación se muestra el Status de mantenimientos de algunas unidades

Tabla 7 Status de Mantenimiento

Campo	TAG	Retraso de overhaul	Puntaje	Retraso de Top OVH	Puntaje	Retraso de Proactivo	Puntaje
Floreña	FL-23-C>-01A	-29640	0	-7640	0	4	10
Floreña	FL-23-C>-01B	-25301	0	-2976	0	112	10
Floreña	FL-23-C>-01C	-23726	0	-1726	5	1371	10
Floreña	FL-23-C>-01D	-29422	0	-7422	0	-1357	0
Floreña	FL-23-C>-02	-46774	0	-21774	0	-3540	0
Floreña	FL-23-C>-04	-50552	0	-28552	0	-4000	0
Floreña	FL-23-C>-101A	-36831	0	-14831	0	-472	8
Floreña	FL-23-C>-101B	-38090	0	-16090	0	-1348	0
Floreña	FL-23-C>-101C	-22793	0	-793	8	13021	10
Floreña	FL-23-C>-101D	-36178	0	-14178	0	-156	8

Se selecciona el puntaje más alto de las tres variables y el tipo de mantenimiento más próximo, a continuación se presenta un ejemplo de la variable Estrategia de Mantenimiento.

Tabla 8 Status Tipo de Mantenimiento

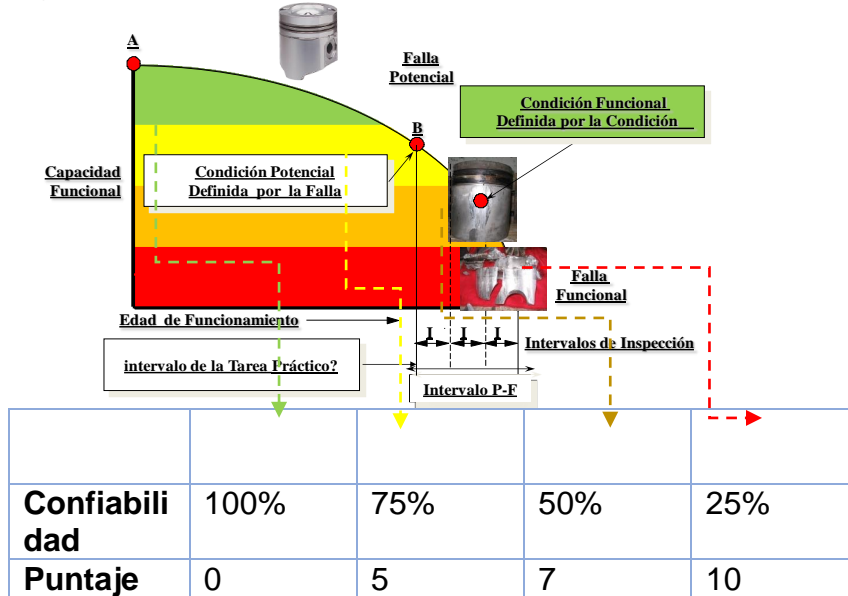
TAG	HRS RETRASO	HRS RETRASO	HRS RETRASO	FACTOR	TIPO DE MANTTO
FL-23-C>-101D	-36178	-14178	-156	8,0	MPI
FL-24-K>-206B	-30473	-5473	505	10,0	MPI
RC-K>-1801C	-1036	580	-354	10,0	OVH
FL-23-C>-101A	-36831	-14831	-472	8,0	MPI
FL-23-C>-01A	-29640	-7640	4	10,0	MPI
FL-23-C>-101B	-38090	-16090	-1348	0,0	
FL-26-ME>-301A	-39465	-16965	-3617	0,0	
FL-K>-38201C	-25506	-3006	557	10,0	MPI

#### 4.4.2 Evaluación de la condición

La condición de un Equipo se establece mediante el monitoreo periódico de los parámetros críticos de las unidades usando técnicas predictivas como: análisis de vibración y ultrasonido en el dominio de la frecuencia, análisis en el dominio del tiempo y análisis de tendencia de parámetro, el análisis de aceite lubricante y del consumo de aceites.

Para hacer la evaluación de la condición de un equipo se utilizan los espectros, formas onda y los niveles de vibración global (overall), sin embargo es necesario hacer una valoración cualitativa ordinal, donde se relacione el estado de los componentes, horas de trabajo.

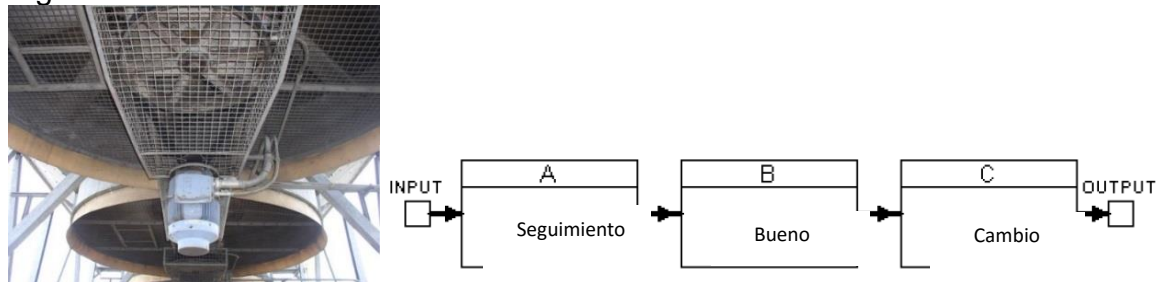
Figura 68 Criterios Puntaje Condición



Fuente: Los Autores

Para evaluar todos los componentes y usando el principio del intervalo P-F (Falla Potencial / Falla funcional) se determina una probabilidad a la condición siguiendo los criterios y luego aplicando la teoría de estimación de confiabilidad para sistemas en serie se establece un valor de probabilidad global denominado Índice de Condición

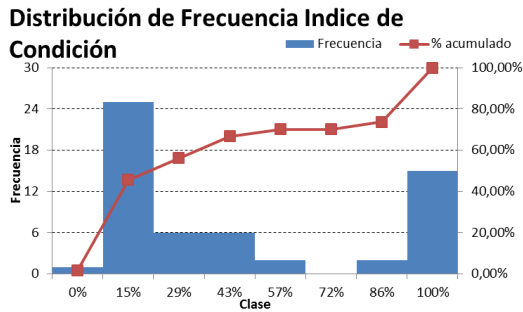
Figura 69 Confiabilidad Sistemas en Serie



$$\begin{aligned}
 \text{Índice de Condición:} &= \frac{\text{Puntaje}_{\text{Motor}} + \text{Puntaje}_{\text{Correa}} + \text{Puntaje}_{\text{Fan}}}{4^3} \\
 &= \text{Índice de Condición} = \frac{3 * 4 * 2}{4^3} = \frac{24}{64} = 37,5\%
 \end{aligned}$$

Fuente: Los Autores

Figura 70 Factor de Criticidad PdM



<b>Puntaje</b>	0	5	7	10

Fuente: Los Autores

A continuación se muestra el Status de Condición de algunas unidades

Tabla 9 Status de Condición

Campo	Tag	Motor	Compresor	Índice Condición	Criticidad Condición
Floreña	FL-23-C>-01A	100%	4%	4%	10
	FL-23-C>-01B	1%	75%	1%	10
	FL-23-C>-01C	10%	100%	10%	10
	FL-23-C>-01D	2%	100%	2%	10
	FL-23-C>-101A	18%	32%	6%	10
	FL-23-C>-101B	18%	42%	8%	10
	FL-23-C>-101C	4%	32%	1%	10
	FL-23-C>-101D	1%	42%	0%	10
	FL-24-K>-206A	82%	100%	82%	0

Fuente: Los Autores

STORK		Predictivo	
		CONDICIÓN	
		35%	
Campo	TAG	INDICE CONDICION	FACTOR
Floreña	FL-23-C>-101D	0%	10,0
Floreña	FL-24-K>-206B	100%	7,0
Recetor	RC-K>-1801C	10%	7,0
Floreña	FL-23-C>-101A	6%	10,0
Floreña	FL-23-C>-01A	4%	10,0
Floreña	FL-23-C>-101B	8%	10,0
Floreña	FL-26-ME>-301A	24%	7,0
Floreña	FL-K>-38201C	100%	0,0

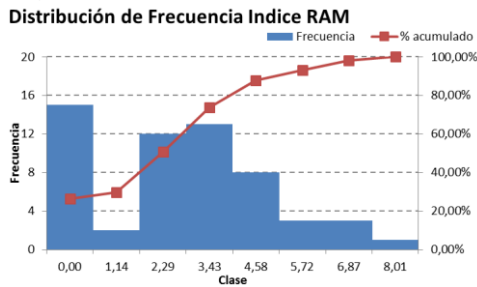
Se selecciona el puntaje más alto de la variable Condición, a continuación, se presenta un ejemplo de la variable PdM.

#### 4.4.3 Desempeño en índices RAM

Para el cálculo del índice, se utilizan las probabilidades estimadas para la Confiabilidad (R), Disponibilidad (A) y Mantenibilidad (M). Con el supuesto de independencia de estas variables.

Se plantea la siguiente formula  $Indice\ RAM_i = |LN(R_i * A_i * M_i)|$ , que hace la interrelación de los resultados, permitiendo evaluar y comparar el desempeño de todos los equipos.

Figura 71 Factor de Criticidad Índice RAM



<b>Puntaje</b>	0	5	8	10

Fuente: Los Autores

Se selecciona el puntaje más alto de la variable RAM, a continuación se presenta un ejemplo de la variable RAM.

Tabla 10 Status RAM

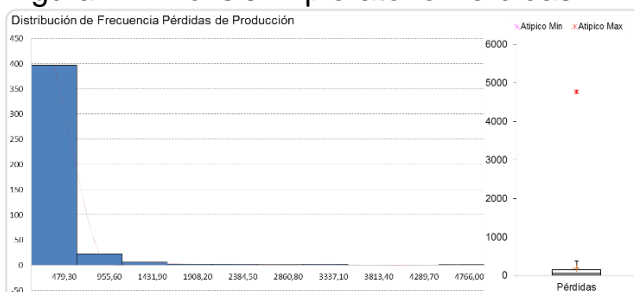
Campo	TAG	Rel @ 720 hrs	Avail @ 7752 Hrs	Mant @ 2hrs	Criticidad	Puntaje
Floreña	FL-23-C>-01A	10%	99%	60%	2,78	8
	FL-23-C>-01B	3%	99%	93%	3,65	8
	FL-23-C>-01C	5%	99%	94%	3,05	8
	FL-23-C>-01D	3%	98%	81%	3,74	10
	FL-23-C>-101A	8%	99%	81%	2,71	8
	FL-23-C>-101B	4%	99%	86%	3,35	8
	FL-23-C>-101C	11%	99%	75%	2,47	8
	FL-23-C>-101D	0%	94%	73%	6,05	10
	FL-24-K>-206A	2%	99%	89%	3,89	10
	FL-24-K>-206B	2%	98%	89%	4,03	10

		Confiability	
		RAM 30%	
Campo	TAG	Prioridad	FACTOR
Floreña	FL-23-C>-101D	6,05	10,0
Floreña	FL-24-K>-206B	4,03	10,0
Recetor	RC-K>-1801C	4,04	10,0
Floreña	FL-23-C>-101A	2,71	8,0
Floreña	FL-23-C>-01A	2,78	8,0
Floreña	FL-23-C>-101B	3,35	8,0
Floreña	FL-26-ME>-301A	6,62	10,0
Floreña	FL-K>-38201C	4,78	10,0

#### 4.4.4 Impactos en producción

Al igual que los datos de las paradas No Planeadas, para entender las pérdidas de producción se analizó el registro de paradas de los Equipos Principales desde 01-Ene-2013.

Figura 72 Análisis Exploratorio Pérdidas



Resumen de Estadísticas Pérdidas		
n		432
Medidas	Promedio	180,745
Tendencia	Mediana	50,500
Central	Moda	10,000
	Max	4766,000
	Min	3,000
Medidas de	Rango	4763,000
Dispersión	Varianza	180610,399
	Desviación Estandar	424,983
	Coefficiente Var	235%
	Coefficiente de Sesgo de Pearson	0,919
Medidas de	Coefficiente de Asimetría	6,018
Forma	Coefficiente de Curtosis	47,055
	Suma	78082,000

Se puede decir que Pérdidas en bls es Heterogeneo, tiene Promedio = 180,75 bls y Desviación Estandar = 424,98 bls, Sesgo a Derecha, bigote inferior menor que el superior, Asimetría Positiva, Alta concentración de valores (Leptocúrtica), 49

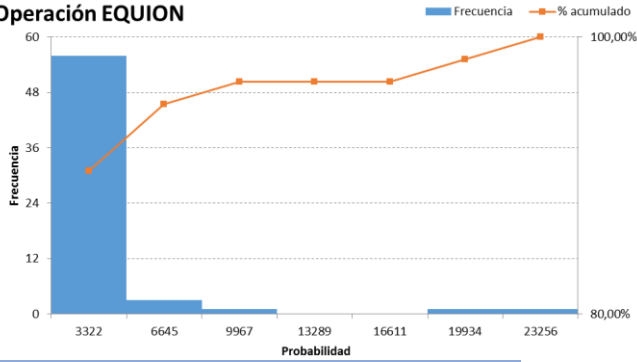
datos atípicos superiores y en el Intervalo (3-479,3) bls, se maximiza la distribución con el 92% de la muestra, (396 observaciones)

Fuente: Los Autores

A continuación, se muestra un ejemplo de la variable Impacto:

Figura 73 Factor Impacto

Distribución Disponibilidad Equipos Principales  
Operación EQUION



<b>Puntaje</b>	1	4	8	10

Fuente: Los Autores



Campo	TAG	IMPACTO
Floreña	FL-23-C>-101D	8,0
Floreña	FL-24-K>-206B	8,0
Recetor	RC-K>-1801C	8,0
Floreña	FL-23-C>-101A	8,0
Floreña	FL-23-C>-01A	8,0
Floreña	FL-23-C>-101B	10,0
Floreña	FL-26-ME>-301A	10,0
Floreña	FL-K>-38201C	8,0
Floreña	FL-23-C>-01D	8,0
Floreña	FL-K>-38201A	8,0
Floreña	FL-26-ME>-301B	10,0
Floreña	FL-K>-38201B	8,0
Floreña	FL-26-ME>-301C	8,0

## 4.5 Matriz de Riesgo

### 4.5.1 La Matriz de Boston

La herramienta de análisis de negocios desarrollada por The Boston Consulting Group denominada como Matriz de Boston™ fue diseñada para la planificación estratégica corporativa usando una matriz de 2 x 2 con cuatro cuadrantes. Evaluando el Crecimiento y la participación en el mercado.

A continuación, se describe brevemente la metodología de implementación

### 4.5.2 Metodología de Implementación matriz de Boston™

1. A los cuadrantes se les asigna los siguientes nombres: Estrella, Interrogante, Vaca y Perro.
2. Se evalúa cada unidad de negocio, producto o servicio, con los siguientes criterios:
  - **Estrella:** Alto crecimiento y participación de mercado.
  - **Interrogante:** Alto crecimiento y Baja participación de mercado.
  - **Vaca:** Bajo crecimiento y alta participación de mercado.
  - **Perro:** Bajo crecimiento y baja participación de mercado es baja.
3. Luego que se ubica en la matriz cada unidad de negocio, producto o servicio y se aplican las siguientes acciones a cada unidad de negocio, producto o servicio
  - **Estrella:** Potenciar al máximo dicha área de negocio.
  - **Interrogante:** Hay que reevaluar la estrategia en dicha área de negocio.
  - **Vaca:** Se trata de un área de negocio que servirá para generar efectivo.
  - **Perro.** Se recomienda deshacerse de ella cuando sea posible.

Tabla 11 Matriz de Boston

Tasa de Crecimiento del Mercado	ALTO	Estrella	Interrogante
			
	BAJO	Vaca	Perro
			
		FUERTE	DEBIL
		Participación en el Mercado	

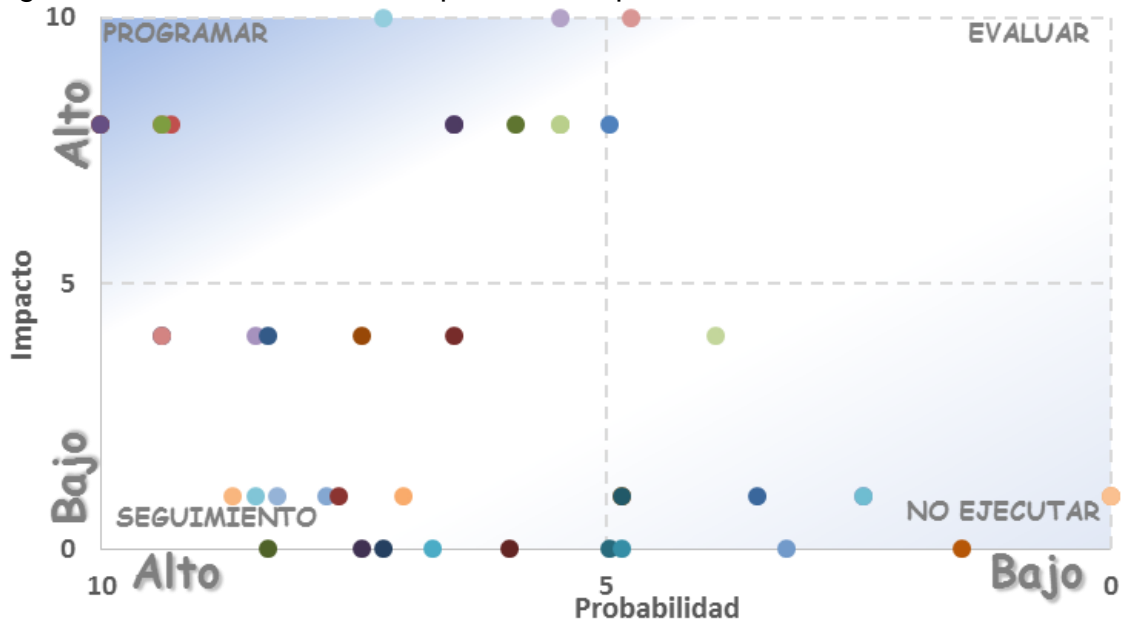
Fuente: The Boston Consulting Group – Los Autores

### 4.5.3 Matriz de Boston Maquinaria Reciprocante

Usando como base los principios de la Matriz de Boston <sup>TM</sup>

- Primero se cambia el crecimiento en el mercado por los Impactos (Producción) y la participación en el mercado por la probabilidad,
- Luego se cambia el nombre a los cuadrantes, teniendo en cuenta las acciones de mantenimientos así:
  - a. Estrella: **Programar.**
  - b. Interrogante: **Seguimiento**
  - c. Vaca: **Evaluar.**
  - d. Perro: **No Ejecutar**
- A continuación a cada equipo se le valora el impacto y la probabilidad de falla, ubicándolo en la matriz como Alto o Bajo.
- Por ultimo en la reunión de planeación se analiza la fecha de intervención de los equipos valorados como Alta Probabilidad de Falla y Alto impacto.

Figura 74 Matriz de Boston Maquinaria Reciprocante



Fuente: Los Autores

## 5 RESULTADOS

Esta metodología de priorización pondera las variables que modifican las fechas para la ejecución de mantenimientos identificado los equipos que en realidad necesitan acciones de mantenimiento. Los logros y mejoras en los indicadores de desempeño son reserva del cliente y de una forma general sin detalles se puede mencionar que hay mejoras en Gestión del Riesgo, Gestión Estratégica, Gestión de Costos, Gestión de Conocimiento, como se describe a continuación:

### GESTION DE RIESGO

Hay una disminución significativa en la exposición del personal ejecutante dado que se hace estrictamente lo necesario.

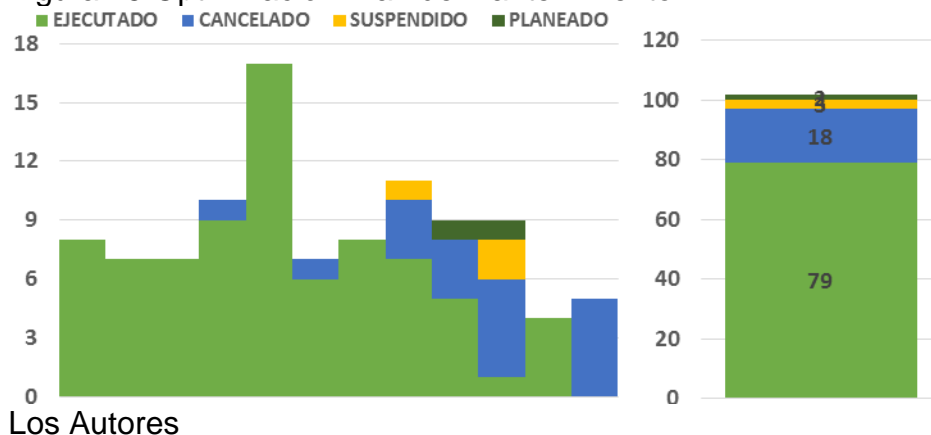
Se focalizan los esfuerzos en equipos que presentan un incremento en su tendencia a la falla atacando las posibles fuentes de falla antes de que se materialicen.

Se aplica la seguridad de proceso, se evalúan los riesgos por fallas asociados fatiga inducida por vibración en la maquinaria recíproca.

### GESTIÓN ESTRATEGICA

Reducción del 5% en la cantidad de mantenimientos preventivos al evaluar todos los equipos de la misma forma.

Figura 75 Optimización Plan de Mantenimiento

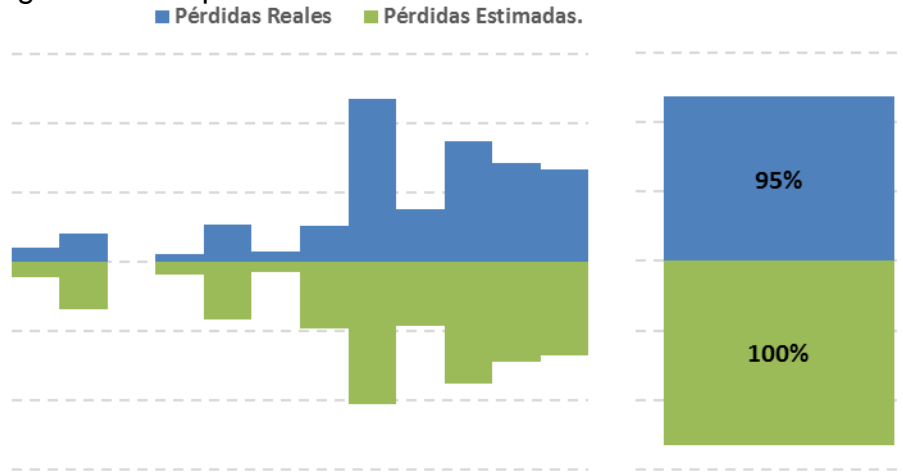


Contribuir a cumplir 95% de la planeación de los mantenimientos respetando al máximo las ventanas operacionales.

### GESTIÓN DE COSTOS

Reducción del 5% en los impactos en producción asociados a mantenimientos preventivos.

Figura 76 Comparativo Pérdidas Asociada a Mantenimiento



Los Autores

Ahorro en repuestos asociados a la ampliación de los tiempos entre los servicios de Mantenimientos Mayores. Hay un ahorro aproximado del 31% en mantenimientos Tipo Overhaul y 28% en Mantenimiento tipo TOP Overhaul.

### **GESTIÓN DE CONOCIMIENTO**

Se desarrollaron algoritmos para cálculos de confiabilidad en Excel, se sugiere que para una versión avanzada haga o se desarrolle en un software de confiabilidad.

Se desarrollaron análisis del comportamiento poblacional de la flota de equipos Reciprocantes. Para una versión más general la metodología de análisis del presente modelo es aplicable a los equipos mayores (rotativos) en una siguiente aplicación.

## 6 CONCLUSIONES

- En el presente documento se deja plasmada la metodología para priorizar las intervenciones de mantenimiento basados en confiabilidad e impacto de los equipos mayores de EQUION en Casanare
- Mediante esta monografía se establece la metodología para la evaluación del comportamiento de las fallas de los equipos principales de la operación EQUION en Casanare, este estatus debe ser continuamente reevaluado con la condición de los componentes críticos de la maquinaria.
- Con la metodología de evaluación propuesta se debe determinar periódicamente la confiabilidad, condición e impactos en la producción de los equipos críticos de la operación.
- Semanalmente se debe determinar el ranking de criticidad dinámico de equipos a los cuales se les debe hacer intervenciones de mantenimiento, teniendo en cuenta su confiabilidad, condición y su impacto en la producción.
- Los procesos de planeación integral y producción deben tomar en cuenta el ranking de criticidad dinámico de los equipos críticos para la programación de intervención de equipos y así disminuir las pérdidas por paradas no programadas.
- La metodología propuesta se alinea al proceso de gestión de mantenimiento de STORK denominado Work Preparation <sup>TM</sup>.

## BIBLIOGRAFIA

ALBARRACIN AGUILLON, Pedro Ramón. Tribología y Lubricación. Bucaramanga: Litochoa, 1993.

ARCINIEGAS, Álvarez Carlos Alberto. Mantenimiento Productivo Total. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Mecánica. 2002.

BERNAL MUÑOZ, Edgar. Mantenimiento y mecánica. En: Mantenimiento Predictivo. Junio, 2002. vol 3.

BUREAU VERITAS. Pipe Vibration Awareness. 2010. Boletín de entrenamiento.

CANAVOS. George C. Probabilidad y Estadística Aplicaciones y Métodos. España. McGraw-Hill. 1984.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. Guidelines for Investigating Chemical Process Incidents. New York 2003.

ENERGY INSTITUTE, Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Failure in Process Pipework, 2nd Edition, London

NIÑO HERRERRA, Nestor Enrique y otro. Metodología de análisis de criticidad para la planeación de mantenimientos de equipos recíprocos mayores en tres facilidades de Oil & Gas. ACIEM. 2013

GOMEZ CUBILLOS, Rafael. Administración y estilos gerenciales. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2006.

GONZÁLEZ BOHÓRQUEZ, Carlos Ramón. Principios de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2006.

ISO 14224 Petroleum, petrochemical and natural gas industries -- Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. 2005.

MONTGOMERY, Douglas C. y RUNGER, George C. Probabilidad y Estadística aplicada a la Ingeniería. 1ra Edición. México McGraw-Hill, 1994

MONTERO TRESPALACIOS, Alex Iván, Análisis de confiabilidad a las unidades de bombeo mecánico de campo Jazmín perteneciente a Mansarovar Energy Colombia Ltd mediante la utilización de distribuciones estadísticas, 2013, 69p Monografía (Especialista en Gerencia de Mantenimiento). Universidad Industrial

de Santander. Facultad de Ingeniería Físico - Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica

MORA GUTIERREZ, Alberto. Mantenimiento estratégico para empresas de industriales ó de servicios. Medellín: AMG. 2005.

MOUBRAY, Jhon. Reliability-Centered Maintenance RCM II. New York: Industrial Press Inc, 1997.

NOWLAN. Stanley. Reliability-Centered Maintenance. San Francisco: U.S. Department of Commerce, 1978.

ORTIZ, Daniel. Memorias Clase de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad - RCM. ESPECIALIZACIÓN DE GERENCIA DE MANTENIMIENTO. Bucaramanga: UIS 2010

PRANDO. Raúl R. Manual Gestión de Mantenimiento a la Medida. 1996.

PRA-1201304(FILOSOFIA\_DE\_SIA\_EQUION) , Práctica - Filosofía de Mantenimiento Superintendencia de Integridad y Activos de Equión Energía Limited, Julio 2015 Rv1.

RIOS RENGIFO, Edwin, Metodología para el mantenimiento basado en condición en compresores recíprocos de gas. 2010, 66p, Monografía (Especialista en Gerencia de Mantenimiento). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

SERRANO SERRANO, Luis Alberto, Plan para la implementación del proceso de confiabilidad e integridad de equipos de superficie para los campos de producción de gas de Chuchupa y Ballena en el departamento de la Guajira, 2012, 98p, Monografía (Especialista en Gerencia de Mantenimiento). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico - Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica

SAE JA1011. Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes. Society of Automotive Engineers Inc, 1999.

SHINOTSUKA, Shinitshi. PM system Corporation. [En línea]. Disponible en internet: <http://www.tpm-us.com/>

SUZUKI, Tokutaro. TPM en industrias de proceso. Madrid: Tgp-Hoshin, 1995.