

**“ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD  
“SISTEMA DEL ASPERSION, ESTACION ACACIAS SUPERINTENDENCIA DE  
OPERACIONES CASTILLA CHICHIMENE”.**

**JAVIER PINZON  
WILSON DANILO RAMIREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER ASEDUIS BOGOTA  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO MECANICA  
ESCUELA DE INGENIERAI MECANICA  
ESPECIALIZACION EN GERENCIA EN MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA**

**2012**

**“ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD  
“SISTEMA DEL ASPERSION, ESTACION ACACIAS SUPERINTENDENCIA DE  
OPERACIONES CASTILLA CHICHIMENE”.**

**JAVIER PINZON**

**WILSON DANILOS RAMIREZ**

**Monografía de Grado presentada como requisito para optar por el título de  
Especialista en Gerencia de mantenimiento**

**Director: DANIEL ORTIZ PLATA**

**Ingeniero Mecánico**

**Especialista en Gerencia de Mantenimiento**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER ASEDUIS BOGOTA**

**FACULTAD DE INGENIERIA FISICO MECANICA**

**ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

**ESPECIALIZACION EN GERENCIA EN MANTENIMIENTO**

**BUCARAMANGA**

**2012**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos agradecer a nuestras familias en especial a nuestras madres y hermanos por brindarnos el apoyo necesario en el camino que crecimiento en nuestras vidas.

Agradecimientos al Ingeniero Daniel Ortiz Plata Director de Tesis

Agradecimientos a la compañía IGgroup S.A. y al Ingeniero Iván Darío Montoya por su aporte en la realización de este trabajo.

Agradecimientos a la Empresa Colombiana de Petróleos Ecopetrol por la disposición de sus instalaciones y de la información de los equipos en la Estación de Acacias.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	19
1. OBJETIVOS	20
1.1. OBJETIVOS GENERALES	20
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. MARCO TEORICO	21
2.1. ¿QUÉ ES EL MANTENIMIENTO?	21
2.1.1. ¿Por qué mantener los equipos?	22
2.1.2. ¿Qué componentes necesitan mantenimiento?	23
2.1.3. Señales que indican la necesidad de mantenimiento	23
2.1.4. Objetivos del mantenimiento	24
2.1.5. ¿Por qué hacer mantenimiento en una empresa?	24
2.1.6. Finalidad del mantenimiento	25
2.2. TIPOS DE MANTENIMIENTO	25
2.2.1. Mantenimiento Preventivo o basado en el tiempo (TBM)	26
2.2.2. Mantenimiento correctivo (MC)	28
2.2.3. MC no planificado	30
2.2.4. MC planificado	30
2.3. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM)	30
2.3.1. Características generales del MCC	31
2.3.2. Las siete preguntas básicas del MCC	31
2.3.3. Proceso de implantación del MMC	32
2.3.4. Equipo de trabajo para el proceso de implantación del MCC	33
2.3.5. Selección del sistema y definición del contexto operacional	34
2.3.6. Método de evaluación de criticidad	36
2.3.7. Criterios de evaluación de criticidad	37
2.3.8. Evaluación de criticidad	40
2.4. ANÁLISIS DE MODO Y EFECTOS DE FALLA (AMEF)	41
2.4.1. Pasos para la creación del AMEF	42
2.4.2. Beneficios del AMEF	43
2.5. INDICADORES DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO	43
2.5.1. Indicadores Básicos	46
2.5.1.1. Confiabilidad (R(t))	47
2.5.1.2. Disponibilidad (A)	49
2.5.2.3. Mantenibilidad (M (t)):	50
2.6. (LIFE-CYCLE COST, LCC) ANÁLISIS COSTO/EFFECTIVIDAD	50
2.6.1. Metodología.	51
2.6.2. Problemas de diseño tradicional.	54
2.6.3. Problemas de Visibilidad del Costo.	56

2.6.3.1. Factores que contribuyen al crecimiento del costo	57
2.6.3.2. Calculo del costo de las funciones de ciclo de vida:	58
2.6.3.3 Estructura de desglose del costo:	60
2.6.3.4. Estimación de los elementos del costo.	63
3. EVOLUCION DEL MANTENIMIENTO	66
3.1 MODELO UNIVERSAL E INTEGRAL, PROPUESTO PARA LA MEDICIÓN DEL CDM.	67
3.2. INTERACCIÓN DEL CMD	68
3.3 COMPORTAMIENTO DE LAS FALLAS	69
3.4 MÉTODOS DE PREDICCIÓN	71
3.5 PARÁMETROS DE FORMA SEGÚN LA ESTADÍSTICA.	73
4. MARCO CONTEXTUAL	74
4.1 UBICACIÓN	74
4.2 EXTRACCION DEL PETROLEO	75
4.3 CARACTERISTICAS DEL CRUDO DE ACACIAS	75
4.4 DESCRIPCION DEL PROCESO	76
4.4.1 Sistema De Recolección	77
4.5 SISTEMA DE PRUEBA	79
4.6 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE CRUDO.	81
4.6.1 Tratamiento de crudo.	81
4.7 DESPACHO.	84
4.8 TRATAMIENTO DEL AGUA	85
4.9 DATOS DE LOS EQUIPO DEL SISTEMA DE ASPERSION.	98
5. ANÁLISIS DE DATOS DE VIDA	103
5.1 ANÁLISIS CMD DEL EQUIPO	105
5.2 ANÁLISIS CMD (MODOS DE FALLA)	107
5.2.1 Análisis CMD para el modo de falla LOA (Pérdida de Carga)	108
5.2.2. Análisis CMD para el modo de falla NOI (Ruido)	114
5.2.3 Análisis CMD para el modo de falla PLU (Taponamiento)	125
5.2.4 Análisis CMD para el modo de falla PV (Preventivo)	130
5.2.5 Análisis CMD para el modo de falla VIB (Vibración)	135
6. ANALISIS DE COSTO	141
7. CONCLUSIONES	144
8. RECOMENDACIONES	149
BIBLIOGRAFIA	151
ANEXO	153

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Matriz de ponderación frecuencia de fallas	37
Tabla 2. Matriz de ponderación impacto operacional	38
Tabla 3. Matriz de ponderación flexibilidad operacional.	38
Tabla 4. Matriz de ponderación costo de mantenimiento	39
Tabla 5. Matriz de ponderación Impacto de seguridad, medio ambiente e higiene	40
Tabla 6. Codificación de los Modos de Falla ligados al equipo.	103
Tabla 7. Históricos de Falla de operación del Equipo vinculados con sus Modos de Falla	104
Tabla 8. Resultados Análisis Confiabilidad vs Tiempo	106
Tabla 9. Ocurrencia de Modos de Falla:	108
Tabla 10. Resultados Densidad de Probabilidad para Confiabilidad Modo de Falla LOA	110
Tabla 11. Datos modo de falla LOA usados para estimar la disponibilidad.	112
Tabla 12. Resultados Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla LOA	113
Tabla 13. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla NOI	116
Tabla 14. Datos modo de falla NOI usados para estimar la disponibilidad	118
Tabla 15. Resultados de Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla NOI	119
Tabla 16. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla NOI	122
Tabla 17. Datos modo de falla NOI usados para estimar la disponibilidad	123
Tabla 18. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla NOI	124
Tabla 19. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla PLU	127
Tabla 20. Datos modo de falla PLU usados para estimar la disponibilidad	127

Tabla 21. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla PLU	128
Tabla 22. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla PV	132
Tabla 23. Datos Modo de falla PV usados para estimar la disponibilidad	133
Tabla 24. Resultados Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla PV	134
Tabla 25. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla VIB	137
Tabla 26. Datos modo de falla VIB usados para estimar la disponibilidad	138
Tabla 27. Resultados de Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla VIB	139

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Siete preguntas del MCC	32
Figura 2. Flujograma de implantación del MCC	33
Figura 3. Equipo de trabajo del MCC	34
Figura 4. Matriz de criticidad	41
Figura 5. Flujograma de implementación del AMEF	43
Figura 6. Representación gráfica de los tiempos	46
Figura 7. Curva de la “bañera”	48
Figura 8. Criterios “Costo-Efectividad”	53
Figura 9. Ciclos de Vida Producción, Proceso y Apoyo	55
Figura 10. El problema de la visibilidad del costo total.	56
Figura 11. El problema de la visibilidad del costo total.	62
Figura 12. Métodos de estimación según las fases.	65
Figura 13. Pantalla de Operación “Múltiple de entrada troncales”	77
Figura 14. Pantalla de Operación “Tanque de surgencia”	78
Figura 15. Pantalla de Operación “Múltiple entrada troncales de prueba”	79
Figura 16. Pantalla de Operación “Tanque de prueba ATK7306”	80
Figura 17. Pantalla de Operación “Tanque de transferencia”	82
Figura 18. Pantalla de Operación “Calentadores 1 y 2 AH7371 y AH7372”	83
Figura 19. Pantalla de Operación “Tanque de lavado ATK7307”	84
Figura 20. Pantalla de Operación “Bomba de despacho AP7301A/B/C”	85
Figura 21. Pantalla de Operación “Celdas d flotación ada7351 y ada7352”	87
Figura 22. Pantalla de Operación “Celdas d flotación ada7351 y ada7352”	89
Figura 23. Pantalla de Operación “Sistema filtración acacias filtro AF341A”	90
Figura 24. Pantalla de Operación “Sistema filtración acacias filtro AF341A”	91
Figura 25. Pantalla de Operación “Piscina de aspersion aba 7361”	94
Figura 26. Pantalla de Operación “Piscina de aspersion ABA7362”	95

Figura 27. Pantalla de Operación “Piscina de aspersion ABA7362”	96
Figura 28. Pantalla de Operación “Piscina de aspersion ABA7362”	97

## LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. curvas de operación la bomba.	101
Grafico 2. Confiabilidad vs Tiempo	106
Gráfico 3. Función de Densidad de Probabilidad (f.d.p) del equipo	107
Gráfica 4. Confiabilidad vs Tiempo para el modo de Falla LOA	109
Gráfica 5. Función Densidad de Probabilidad para Confiabilidad Modo de Falla LOA	110
Gráfica 6. Histograma de fallas comparando análisis de datos suspendidos para un tiempo de 1440 horas, 2 meses.	111
Grafica 7. Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla LOA	113
Gráfica 8. Curva función densidad probabilidad de la disponibilidad modo de falla LOA	114
Gráfica 9. Confiabilidad vs Tiempo para el modo de Falla NOI	115
Gráfica 10. Función de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla NOI	116
Gráfica 11. Histograma de fallas comparando análisis de datos suspendidos para un tiempo de 1440 horas, 2 meses.	117
Grafica 12. Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla NOI	119
Gráfica 13. Curva función densidad de probabilidad de la disponibilidad del modo de falla NOI	120
Gráfica 14. de Confiabilidad vs Tiempo para el modo de Falla NOI	121
Gráfica 15. Función de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla NOI	121
Gráfica 16. Histograma de fallas comparando análisis de datos suspendidos para un tiempo de 1440 horas, 2 meses	122
Grafica 17. Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla NOI	124
Gráfica 18. Curva función densidad de probabilidad de la disponibilidad del modo de falla NOI	125

Gráfica 19. Confiabilidad vs Tiempo para el modo de Falla PLU	126
Grafica 20. Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla PLU	128
Gráfica 21. Curva función densidad de probabilidad de la disponibilidad del modo de falla PLU	129
Gráfica 22. Histograma de fallas comparando análisis de datos suspendidos para un tiempo de 1440 horas, 2 meses.	130
Gráfica 23. Confiabilidad vs Tiempo para el modo de Falla PV	131
Gráfica 24. Función de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla PV	132
Grafica 25. Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla PV	134
Gráfica 26. Curva función densidad de probabilidad de la disponibilidad del modo de falla	135
Gráfica 27. Confiabilidad vs Tiempo para el modo de Falla VIB	136
Gráfica 28. Función de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla VIB	137
Grafica 29. Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla VIB	139
Gráfica 30. Curva función densidad de probabilidad de la disponibilidad del modo de falla	140
Grafica 31. Costo proyectado cada 3 meses	141
Grafica 32. Costo proyectado cada 2 meses	142

## GLOSARIO

**Crudo:** abreviación utilizada para nombrar al petróleo crudo sin refinar, es una mezcla de hidrocarburos, compuestos de azufre, nitrógeno y oxígeno: el crudo se obtiene de yacimientos subterráneos en forma de líquido viscoso de color negruzco.

**Comportamientos de falla:** análisis realizado a una falla repetitiva para identificar su origen.

**Palpar:** examinar por medio del sentido del tacto con el fin de identificar una condición.

**Analogía:** relación de semejanza entre cosas distintas.

**Estaciones de tratamiento:** sistemas compuestos por personal, equipos

**Asfalto:** Hidrocarburo natural de color negro intenso, sólido, frágil, de fractura concoidea, lustroso y de estructura heterogénea.

**Vertimiento:** término utilizado para designar los residuos de un proceso por lo general industrial pueden ser líquidos o sólidos.

**Colector:** punto en el cual convergen varias tuberías con el fin de unir los caudales de diferentes ramales.

**Manifold:** termino de origen americano que se traduce por tubería con varias aberturas para realizar conexiones.

**Carcasa:** Cubierta externa, resistente, que suele constituir la pared de un recipiente o dispositivo mecánico

**MTBF:** (Medium Time Between Failures) Tiempo medio entre fallas.

**MTTF:** (Medium Time To Repair) Tiempo medio por reparación.

**Tasa de mortalidad:** es la proporción de fallas ocurridas por una causa concreta en un periodo de tiempo en un número de equipos de terminados.

**Inspección:** acción de examinar, revisar, verificar para establecer las condiciones o estado de un equipo.

## RESUMEN

TITULO: "ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD  
"SISTEMA DEL ASPERSON, ESTACION ACACIAS SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  
CASTILLA CHICHIMENE".

AUTORES: Javier Pinzón Ayala, Wilson Danilo Ramírez\*\*

PALABRAS CLAVES: Mantenimiento, confiabilidad (Rt), riego, frecuencia, tiempo fuera de servicio (TPFS), tiempo entre fallas (TFS), tiempo de operación (TO), tiempo para reparar (TPPR), tiempo fuera de control (TPFC), mantenibilidad (Mt), disponibilidad (A), weibull, curva de bañeras, confiabilidad exponencial y análisis de costo/efectividad.

DESCRIPCION el siguiente trabajo brinda al lector conocimientos básicos de cómo realizar un análisis por método estadístico. Para pronosticar y evitar consecuencias de fallas, y también para mitigar los diferentes factores que generan paradas de los equipos.

Surge en repuesta a los diferentes modos de fallas que se viene presentado en estos equipos, y también con el objetivo de generar conclusiones enfocadas en cada uno de los componentes del sistema de tratamiento de la estación acacias con sus respectivas recomendaciones.

Se expone el concepto de Weiboll, normal, lognormal entre otros modelos utilizados como herramientas claves para lograr el análisis de resultados a través de la estadística aplicada a la información que se extrae de los software de mantenimiento en este caso el elipse en ECOPETROL.

La guía es de uso práctico para el personal de ingeniería, en las áreas productiva, de mantenimiento, proyectos, y también para el personal técnico quienes en función de su experiencia ejecutan y están en constante contacto con los equipos. Logrando generar una gran confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad de equipos como sistema, basándose en la metodología CMD y tomando en cuenta las conclusiones y recomendaciones enfocadas a eliminar los malos actores que afectan el sistema

Adicional mente el personal encontrara una guía confiable para realizar este tipo de análisis aplicando los conceptos a situaciones similares en empresa del área industrial en el sector petrolero.

---

\* Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.  
Director: Daniel Ortiz Plata

## SUMMARY

TITLE: "Reliability Analysis"  
"SPRINKLER SYSTEM, STATION OPERATIONS SUPERINTENDENT ACACIAS ACACIAS CHICHIMENE CASTLE"

AUTHORS: Javier Ayala Pinzon, Wilson Danilo Ramírez \*\*

KEYWORDS: Maintenance, reliability (Rt), irrigation frequency, downtime (STPP), time between failures (TFS), operation time (OT), time to repair (TPPR), time out of control (TPFC) , maintainability (Mt), availability (A), weibull, bathtub curve, exponential reliability and cost / effectiveness.

DESCRIPTION The following paper provides the reader with basic knowledge of how to perform a statistical analysis method. To predict and prevent potential failures, and to mitigate the different factors that lead teams stops.

Arises in response to different modes of failure that has been presented in these teams, and also with the aim to generate findings that focus on each of the components of the treatment system of the station acacias with their recommendations.

It discusses the concept of Weiboll, normal, lognormal and other models used as key tools to achieve results through analysis of statistics applied to the information extracted from the software maintenance in this case the ellipse ECOPETROL.

The guide is of practical use to the engineering staff in the areas of production, maintenance, projects, and technical staff who according to his experience running and are in constant contact with the teams. Managed to generate a high reliability, maintainability, availability of equipment as a system, based on the methodology CMD and taking into account the conclusions and recommendations aimed at eliminating bad actors that affect the

Additional staff mind find a reliable guide for this type of analysis applying the concepts to similar situations in the industrial company in the oil sector.

---

\* Monograph  
Faculty of Engineering Physics and Mechanics. Maintenance Management Specialization.  
Director: Daniel Ortiz Plata

## INTRODUCCION

El objetivo del proyecto es dar a conocer una herramientas para el área de mantenimiento basada en el análisis estadístico “métodos estadísticos de confiabilidad” para el sector de hidrocarburos. El propósito de este trabajo es mostrar un modelamiento estadístico del sistema de aspersion de la estación acacias, que pueda ser aplicable a los tratamientos de crudo, este método permite establecer programas de mantenimiento predictivo, estimación de disponibilidad operacional, cálculo de vida útil y cálculos de diagramas todo esto para reevaluar frecuencias de mantenimiento, mitigar impacto de las fallas, disminuir tiempos de intervención de los equipos en los mantenimientos.

En la actualidad se evidencia la preocupación desde el área de mantenimiento y producción por prevenir la recurrencia de fallas en los sistemas de aspersion debido al impacto sobre la seguridad del individuo, equipos y medio ambiente, además de garantizar un alto grado confiabilidad del equipo y procesos, disminuyendo costos. Existen diversos métodos para evaluar las necesidades expuestas anteriormente siendo los más utilizados los modelos matemáticos que expresen comportamientos de falla, como lo son: Exponencial, Weibull, Normal, Log Normal y Gamma.

El propósito general de este trabajo es el de mostrar los lineamientos básicos que establecen las normas SAEJ1739 , ISO14224 y SAEJ1011, para dar pautas en función del mejoramiento continuo y garantizar por medio del resultado estadístico la Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad operacional.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVOS GENERALES**

Establecer un conjunto de actividades como propuesta viable y fundamentada con base en la información analizada a partir de las evidencias de los malos actores identificados como factores que ocasionan la ineficiencia del sistema de tratamiento de aguas de la estación acacias.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Se aplicara un método de análisis estadístico a las fallas encontradas en el sistema de aspersión de Acacias para identificar las variables que provocan en el sistema

Evidenciar fallas potenciales que están afectando en mayor o menor medida utilizando “CDM” en el sistema de aspersión, para establecer recomendaciones con el fin de mejorar los tiempos fuera de servicio TFS. en la operación

Entregar recomendaciones planteado alternativas para disminuir el impacto de malos actores que inciden en el sistema actual.

## 2. MARCO TEORICO

A continuación se describen las razones, las herramientas y los procedimientos que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del proyecto.

### Razones para implementar mantenimiento

En la industria siempre existe una pregunta muy sencilla ¿Por qué y para que implementar mantenimiento?, la respuesta no parece tan simple, por ello se trataran algunos temas que ofrecen parámetros para encontrar una respuesta razonable.

#### 2.1. ¿QUÉ ES EL MANTENIMIENTO?

Mantenimiento son las actividades que se efectúan con regularidad y que necesitan las máquinas para funcionar bien sin llegar a entorpecer un proceso, de forma segura y por largo tiempo. Tener en mente que el mantenimiento no es la reparación de la máquina después que se avería aunque sea parte del mismo. Mantenimiento “es prever que la máquina de algún modo se averíe o desgaste antes de su tiempo de vida útil, además de determinar cuándo se presentará la falla”.

Son tres los enemigos contra los cuales hay que proteger todas las máquinas.

- **Desgaste:** El desgaste es el primer enemigo contra el cual hay que proteger las máquinas. Las piezas en una máquina rozan y giran una contra otra hasta que calientan y dilatan, la falta de ajuste de los mecanismos recae en

esfuerzos, la limpieza no realizada por parte de los operadores o mantenedores provoca malos funcionamientos que recaen en desgaste. Las operaciones que buscan, lubricar ayudan a proteger los equipos contra la fricción, y por tanto contra el desgaste.

- **Suciedad:** El desgaste es el primer enemigo, y la suciedad el segundo contra los cuales hay que proteger las máquinas. El ingreso de partículas de suciedad en un sistema mecánico o cualesquier otro sistema, generan desgaste prematuro en las partes sometidas a rozamiento, debido a que esas partículas impiden el perfecto funcionamiento de las partes y generan ralladuras que desgastan de manera acelerada, otro efecto de la suciedad en las máquinas es el taponamiento de puntos o sistemas de circulación que impiden el desempeño de los mismos.
- **Desajuste:** El desajuste es el tercer enemigo más importante contra el cual hay que proteger las máquinas. Este puede producir el calentamiento de las partes que conlleva la fragilización de los materiales, sobre esfuerzos al interior de los mecanismos que se reflejan en la rotura de partes, puede permitir el paso de sustancias que deterioran los equipos en su parte eléctrica como mecánica. Por tanto, para evitar este efecto, las máquinas deben contar con rutinas de ajuste que eviten que los equipos presenten dichos síntomas.

### 2.1.1. ¿Por qué mantener los equipos?

Las principales razones que obligan a mantener en buen estado las máquinas son los que directamente se relacionan con el dinero, por ejemplo: el tiempo, la seguridad y el medio ambiente. Si se demora más tiempo una operación en la está incluido un equipo, este consume más energía, recursos, hay que pagar más salarios y por consiguiente la máquina se desgasta más rápidamente. El buen

mantenimiento conserva disponibles los equipos para trabajar. Evita demoras, ahorra tiempo, dinero y minimiza la probabilidad de accidentes

### **2.1.2. ¿Qué componentes necesitan mantenimiento?**

Todos los elementos que componen una máquina requieren de mantenimiento, algunos con más detalle que otros pero al final es mantenimiento, el hecho de limpiar y retirar el polvo de un monitor, eso es mantenimiento la única diferencia es el nivel de experticia con que se realiza, por consiguiente, todas las actividades cuyo objetivo sea el de conservar de manera adecuada un equipo hacen parte de la lista de actividades de mantenimiento y cuyo objetivo sea siempre conservar la disposición de un equipo con buena presentación y listo para cumplir con su función.

### **2.1.3. Señales que indican la necesidad de mantenimiento**

Además de las horas de mantenimiento recomendadas en los manuales de los equipos, la atención cuidadosa al rendimiento, la apariencia, el sonido, sensación y aromas de una máquina puede indicarle cuando se requiere de actividades de mantenimiento.

- **Observar:** Si hay piezas dañadas, los visualizadores de las diferentes variables, temperatura, presión, velocidad, consumo entre otras, si hay recalentamiento, presión de aceite baja, alta carga del sistema eléctrico, desajuste mecánico o alguna otra señal de problemas.
- **Escuchar:** Si hay ruidos poco comunes tal como chirridos, vibración excesiva o golpeteos. Le advierten que hay piezas rotas o muy dañadas o funcionando fuera de su condición de diseño.

- **Palpar:** siempre considerando que no exista movimiento si hay correas, cadenas, tuercas, pernos sueltos y vibraciones poco comunes.
- **Oler:** Si hay cojinetes o equipos eléctricos recalentados, correas deslizando, lubricantes descompuestos o que entran en contacto con líquidos que deterioran el mismo, reacciones químicas entre limpiadores y lubricantes.

#### **2.1.4. Objetivos del mantenimiento**

En el caso del mantenimiento su organización e información debe estar encaminada a la permanente consecución de los siguientes objetivos

- Optimización de la disponibilidad del equipo productivo.
- Disminución de los costos de mantenimiento.
- Optimización de los recursos humanos.
- Disminuir al máximo la probabilidad de accidentes
- Evitar daños al medio ambiente
- Maximización de la vida útil de equipo.

#### **2.1.5. ¿Por qué hacer mantenimiento en una empresa?**

Porque el mantenimiento representa una inversión de corto, mediano y largo plazo que se evidenciara en ganancias no sólo para la compañía y sus inversionistas, sino que también se revertirá en mejoras en la producción, haciéndola más competitiva en la actualidad, otro argumento adicional es el ahorro que representa tener índices de accidentalidad bajos.

El mantenimiento representa un habilidad importante que está siempre en desarrollo para una compañía, pues impacta en seguridad industrial y en salud ocupacional, ya que un porcentaje de accidentes son causados por desperfectos en los equipos que pueden ser prevenidos.

### **2.1.6. Finalidad del mantenimiento**

Conservar la planta industrial con los equipos, los edificios, los servicios y las instalaciones en condiciones de cumplir con la función para la cual fueron construidos o adquiridos, también con la capacidad y la calidad especificadas, siendo utilizados en condiciones de seguridad y ahorro de acuerdo a un nivel de ocupación y a un programación de uso definidos en función de los requerimientos de la planeación de la Producción.

## **2.2. TIPOS DE MANTENIMIENTO**

El mantenimiento es uno de los factores indispensable para el buen funcionamiento y desarrollo de las operaciones. Se puede definir como el conjunto de actividades que está de acuerdo a las habilidades del personal que entra en contacto con los equipos que pueden ser técnicos o de operación y que tienen el objetivo de evitar paros en la operación:

- Reparar los fallos que se presenten.
- Evitar su reincidencia
- Prever que nuevos fallos puedan presentarse mediante inspecciones y otras técnicas más complejas como técnicas estadísticas, seguimiento y diagnóstico de máquinas.
- Especificar las normas de manipulación y las correctas prácticas de los operadores de las máquinas.
- Los planes de mantenimiento son parte vital de cualquier empresa, ya que el buen funcionamiento de los equipos permiten operaciones productivas.
- Utilizar últimas tecnologías para la predicción de fallos

Existen diversos tipos básicos de mantenimientos que se llevaran a cabo para los equipos.

### **2.2.1. Mantenimiento Preventivo o basado en el tiempo (TBM)**

El TBM o también conocido como MP es sólo una manera de tratar de determinar cuándo y qué se descompondrá o se desgastará para ser reemplazado antes de que suceda una falla.

El MP es mucho más grande que eso, es un enfoque integral a presupuestar, analizar el fracaso, y elimina el uso excesivo del recurso y la corrección permanente de asuntos problemáticos. El MP puede ser visto realmente como un estilo de vida.

Los sistemas de MP deben ser diseñados para el equipo actual teniendo en cuenta los siguientes factores: a) minimizar las interrupciones del equipo, b) antigüedad del equipo, c) servicio prestado, d) tipo de servicio, e) horas de operación y f) habilidad de los operarios.

El MP aumenta el tiempo productivo, reduce el uso de energía, reduce los acontecimientos imprevistos, reduce las cuentas por transporte, etc. Hay centenares de maneras donde el MP ahorra en los recursos de la organización. La omisión del MP se verá reflejado antes de lo que se puedan imaginar tanto en los costos como en la productividad.

Personal no especializado (en mantenimiento) puede hacer parte de las tareas de MP exitosamente con una buena instrucción y objetivos claros. Para un mejor retorno de la inversión se debe incluir también al personal capacitado. Las actividades cotidianas (lubricación, limpieza o apretar tuercas) ciertamente pueden

ser realizadas por personal entrenado pero no un técnico de mantenimiento. Generalmente la inspección se beneficia mucho de ojos y manos experimentadas.

Toda actividad proactiva del mantenimiento forma parte del MP. Esto incluye los enfoques más modernos incluyendo rutas de vibración, inspecciones infrarrojas, o verificación del mantenimiento basado en condición o también conocido como CBM. Las más recientes estrategias de MP inician la actividad en alguna condición (tal como inicia la lista de la tarea cuando el calibrador de la temperatura lee 220°).

El MP no puede hacer que un motor de 5 hp haga el trabajo de un motor de 10 hp pero si puede hacer que funciones más tiempo sin deteriorar su condición.

Por otra parte, para mantener una base de datos sólida en mantenimiento se debe poseer un sistema de información que sea retroalimentado en tiempo real, con alta fiabilidad en datos pues de esto depende que en el futuro próximo se puedan tomar decisiones acertadas, estos datos deben ser de conocimiento tanto de técnicos como de operadores y se deben socializar los resultados en lapsos definidos de tiempo para que los equipos de trabajo vean los resultados de la gestión, para esto se debe tener presente que la información de mantenimiento debe abarcar los siguientes aspectos:

- Equipo
- Inventario de repuestos
- Compras
- Personal
- Mantenimiento preventivo
- Ordenes de trabajo
- Reportes

### **2.2.2. Mantenimiento correctivo (MC)**

El mantenimiento como toda actividad que ha estado obligada a perfeccionarse a través del tiempo, posee una fase inicial, es el caso del MC. Se habla inicialmente de actividades de MC, en las cuales ya se establece la necesidad de crear, puestos de trabajo para cubrir estas necesidades, específicamente para mantenimiento (Correctivo), por lo tanto se establecen de igual forma procedimientos para efectuar esta actividad.

Al no existir el mantenimiento como una actividad metódica de trabajo, y al no tener la filosofía de predecir o programar los posibles daños, las actividades de mantenimiento se centran en ejecutar intervenciones solo cuando existía una falla que interrumpiera parcial o totalmente una operación.

Al conceptualizar el MC, se podría decir que es la actividad que se ejecuta solo y únicamente cuando existe una falla, que interrumpe o modifica las condiciones normales de funcionamiento de un equipo, esto es conocido como la pérdida de función de un elemento del sistema o la disminución de la velocidad por el estado de la misma.

En el MC, contrario al MP, impide optimizar el tiempo de operación de los equipos, en la medida que se prolonga a su máximo la vida de los elementos pero como consecuencia se genera desajustes, deterioros exagerados en la piezas, que impiden establecer con anterioridad la cantidad de repuestos, de talento humano y el tiempo requerido para la intervención, por tanto, cuando se prolonga la vida de un elemento a su máximo se está acelerando el deterioro prematuro del conjunto (equipo).

**Ejemplo:** Si se toma el caso de un eje soportado con dos chumaceras (rodamientos), en donde una de las chumaceras presenta desgaste y no se

procede al recambio, se está generando sobre el eje vibraciones que aceleran su desgaste por fatiga y ondulaciones a lo largo del eje, y este a su vez emite sobre la chumacera “en buen estado” las vibraciones recibidas, y es ahí donde falla el conjunto. Se identifica en el ejemplo que hace falta de un recambio de una de las chumaceras con anterioridad, se ve la necesidad de cambiar las dos chumaceras y el eje ya que no garantiza un eje uniforme.

El MC, es un evento que se puede eliminar por completo, sin embargo para lograrlo requiere de un gran trabajo que debe estar enfocado en la capacitación del personal tanto de operación como de mantenimiento, adicional se debe tener un robusto sistema de información tanto de costos como de indicadores de mantenimiento y apoyo de área productiva de los mandos desde la base hasta la dirección, y como complemento la información debe fluir no piramidalmente sino esféricamente en donde cualquier punto de la esfera puede ser el centro o un punto sobre la circunferencia siempre relacionada con el evento, siempre pensamos que al realizar más mantenimiento preventivo vamos a disminuir las averías, esta afirmación es cierta solo si enfocamos nuestro esfuerzo guiados por el faro de la información el cual a medida que avanzamos nos mostrara que nos acercamos a tierra firme, como consecuencia se incrementa la confiabilidad y la disponibilidad del equipo, parte de la “mejora continua” en los procesos de mantenimiento es minimizar los MC en la medida que se invierte en promedio la mitad de los recursos del MC en MP.

↑ Mantenimiento Preventivo = ↓ Mantenimiento Correctivo

→ Información de mantenimiento → PHVA

Durante la operación de los equipos, es evidente que debe contemplar el factor humano, el personal que opera y mantiene los equipos debido a la presión, por ende, se deben someter a consideración, algunas de las razones que inducen a la presión de tiempo:

- a. Limitaciones de tiempo
- b. Desarrollar múltiples tareas
- c. La presión de otros compañeros para trabajar rápidamente

### **2.2.3. MC no planificado**

Es el mantenimiento de emergencia (reparación de roturas). Debe efectuarse con urgencia ya sea por una avería imprevista a reparar lo más pronto posible o por una condición imperativa que hay que satisfacer (problemas de seguridad, de contaminación, de aplicación de normas legales, etc.).

### **2.2.4. MC planificado**

Se sabe con antelación qué es lo que debe hacerse, de modo que cuando se pare el equipo para efectuar la reparación, se disponga del personal, repuesto y documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente.

## **2.3. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM)**

“Filosofía de gestión del mantenimiento, en el cual un equipo multidisciplinario de trabajo, se encarga de optimizar la confiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, estableciendo las actividades más efectivas de mantenimiento en función de la criticidad de los activos pertenecientes a dicho sistema, tomando en cuenta los posibles efectos que originaran los modos de fallos de estos activos, a la seguridad, al ambiente y a las operaciones”<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Moubray, John. “RCM II: Reliability Centered Maintenance”. Industrial Press Inc. New York – USA. 1991.

“En otras palabras el RCM o MCC (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) en español es una metodología que permite identificar estrategias efectivas de mantenimiento para garantizar el cumplimiento de los estándares requeridos por los procesos de producción”<sup>2</sup>.

### **2.3.1. Características generales del MCC**

- Herramienta que permite ajustar las acciones de control de fallos (estrategias de mantenimiento) al entorno operacional.
- Metodología basada en un procedimiento sistemático que permite generar planes óptimos de mantenimiento (produce un cambio cultural).
- Los resultados de la aplicación del MCC, tendrán su mayor impacto, en sistemas complejos con diversidad de modos de fallo (ejemplo: equipos rotativos grandes).
- Maduración: mediano plazo y largo plazo.<sup>3</sup>

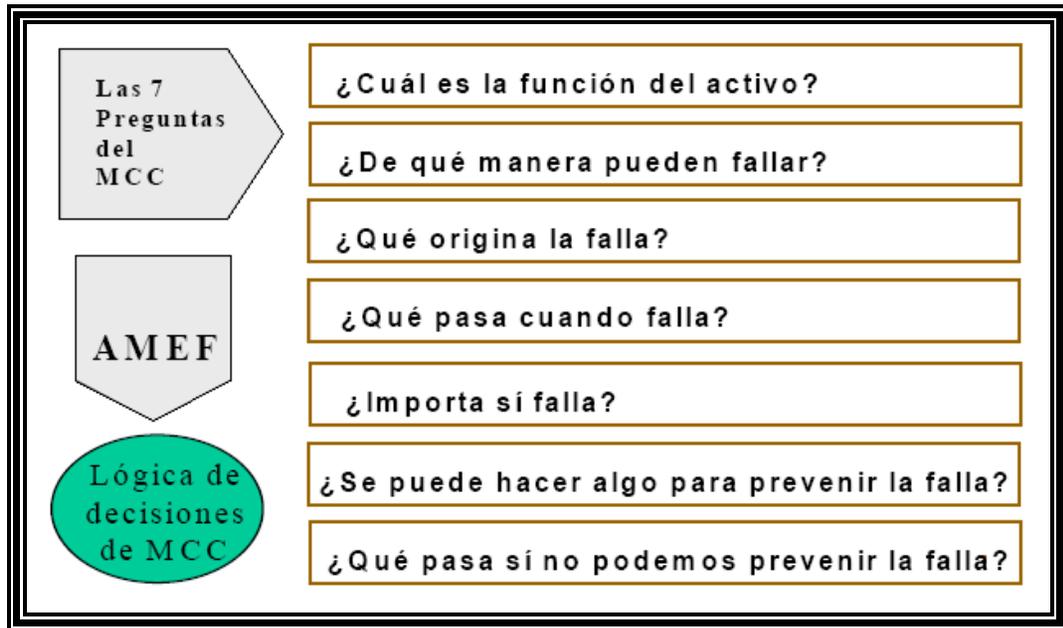
### **2.3.2. Las siete preguntas básicas del MCC**

La metodología MCC, propone un procedimiento que permite identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos en su contexto operacional, a partir del análisis de las siguientes siete preguntas, ver figura 1.

---

<sup>2</sup>Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005.

**Figura 1. Siete preguntas del MCC**



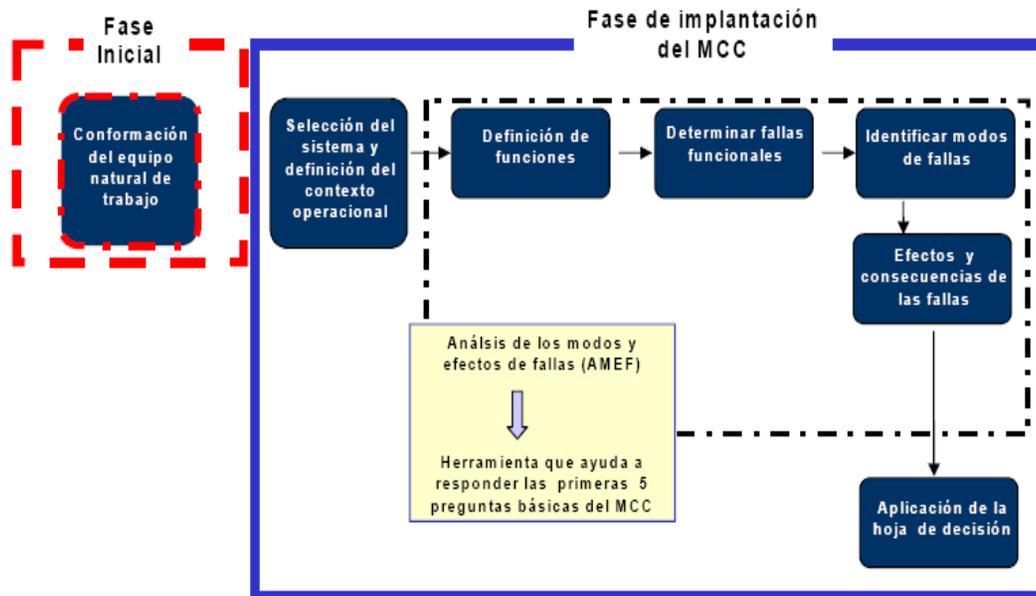
**Fuente:** Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

<sup>3</sup>Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005.

### **2.3.3. Proceso de implantación del MMC**

A continuación se presenta el esquema propuesto para implementar el MCC: El éxito del proceso de implementación del MCC, dependerá básicamente del desempeño del equipo natural de trabajo, el cual se encargara de responder las siete preguntas básicas del MCC, siguiendo la figura2.

**Figura 2. Flujograma de implantación del MCC**



**Fuente:** Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

#### 2.3.4. Equipo de trabajo para el proceso de implantación del MCC

Un equipo natural de trabajo, se define dentro del contexto del MCC, como un conjunto de personas de diferentes funciones de la organización que trabajan juntas por un periodo de tiempo determinado en un clima de potenciación de energía, para analizar problemas comunes de los distintos departamentos, apuntando al logro de un objetivo común.<sup>4</sup> Como se observa en la figura 3.

<sup>4</sup>Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005.

**Figura 3. Equipo de trabajo del MCC**



**Fuente:** Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

### 2.3.5. Selección del sistema y definición del contexto operacional<sup>5</sup>

Una vez se ha seleccionado el área piloto y se conoce de forma general la importancia de cada una de las áreas de la organización, es necesario que los grupos de trabajo MCC, respondan claramente las dos siguientes preguntas:

- 1) ¿Cuál debería ser el nivel de detalle (parte, equipo, sistema, planta...) que se requiere para realizar el análisis de los modos y efectos de fallos del área seleccionada?
- 2) ¿Debería ser analizada toda el área seleccionada, y si no es necesario analizar toda el área, que debería hacerse para seleccionar la parte del área a ser analizada y con qué prioridad debe analizarse cada una de las partes (activos) del área elegida?

<sup>5</sup>Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005.

Para entender lo que significa nivel de detalle (nivel de ensamblaje), es necesario que los grupos de trabajo confirmen o definan los distintos niveles de ensamblaje que presenta una determinada organización. Este nivel de ensamblaje se refiere específicamente al grado e división existente de la organización: corporación, filiales, departamentos, plantas, sistemas, equipos, componentes, son ejemplos de división de una determinada organización. A continuación se definen algunos términos necesarios para entender lo que significa el nivel de detalle o ensamble:

**Parte:** Representa el más bajo nivel de detalle al cual un equipo puede ser desensamblado sin ser dañado o destruido, ejemplo: rodamiento, rotor, arrancador.

**Equipo:** Nivel de detalle constituido por un grupo o colección de partes ubicadas dentro de un paquete identificable, el cual cumple al menos un función de relevancia como ítem independiente, ejemplo: motor eléctrico.

**Sistema:** Nivel de detalle constituido por un grupo lógico de equipos los cuales cumplen una serie de funciones requeridas por un planta. La mayoría de los sistemas están agrupados en función de los procesos más importantes de una planta. Por lo general, las plantas están compuestas por varios sistemas mayores, para el caso Serinco, tales como: control de pozo, manejo de lodos del pozo, transmisión de potencia, izaje y levante.

**Planta:** Nivel de detalle constituido por un grupo lógico de sistemas que funcionan en conjunto para proveer un output (electricidad) o un producto (Gasolina, petróleo, etc.) por procesamiento y manipulación de varios input como materiales y recursos (madera, agua, etc.).<sup>6</sup>

<sup>6</sup>Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

**Área:** Nivel de detalle constituido por un grupo lógico de plantas que funcionan en conjunto para proveer varios output de una misma clase o de distintas clases, por ejemplo, un grupo de plantas de hidrogeno constituyen un área denominada complejo de hidrogeno.

### **2.3.6. Método de evaluación de criticidad**

Es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de optimizar el proceso de programación de tareas y asignación de recursos. El análisis de criticidad permite identificar los equipos que requieren mayor atención por parte de las áreas de mantenimiento y producción.<sup>7</sup>

Los resultados del análisis de criticidad sirven para:

- Priorizar ordenes de trabajo de mantenimiento.
- Jerarquizar las inversiones según su importancia.
- Plantear el manejo de las actividades de mantenimiento.
- Facilitar la gestión de materiales y repuestos.
- Enfocar las estrategias de mantenimiento hacia los sistemas y equipos críticos.

Para realizar el análisis de criticidad se debe:

- Identificar los equipos.
- Definir el nivel de detalle y el objetivo del análisis.
- Recolectar información de los equipos.
- Consultar al personal relacionado con los equipos.

<sup>7</sup>Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

El análisis de criticidad genera resultados semicuantitativos, basados en la teoría del riesgo:

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

$$\text{Frecuencia} = \text{N}^{\circ} \text{ de fallas en un tiempo determinado}$$

$$\text{Consecuencia} = [(\text{Impacto Operacional} \times \text{Flexibilidad}) + \text{Costos de mantenimiento} + \text{Impacto SAH}]$$

### 2.3.7. Criterios de evaluación de criticidad

A continuación se presentan cada uno de los ítems necesarios para evaluar la criticidad operacional de acuerdo al nivel de detalle seleccionado.

**Frecuencia de fallas:** La frecuencia de fallas como su nombre lo indica es la cantidad de fallas que se presentan en un periodo determinado de tiempo.

**Tabla 1. Matriz de ponderación frecuencia de fallas**

<i>Nivel</i>	<i>Criterio (fallas/año)</i>	<i>Ponderación</i>
Deficiente	Mayor a 4	4
Promedio	De 2 a 4	3
Buena	De 1 a 2	2
Excelente	Menos de 1	1

**Fuente:** Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

**Impacto operacional:** El impacto operacional se refiere a las consecuencias que ocasiona una falla la operación del equipo.

**Tabla 2. Matriz de ponderación impacto operacional**

<b><i>Criterio</i></b>	<b><i>Ponderación</i></b>
Parada del equipo (Equipo inactivo)	10
Parada del sistema e impacta a otros	7
Impacta en la velocidad de la operación	4
No genera ningún efecto	1

**Fuente:** Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

**Flexibilidad operacional:** La flexibilidad operacional se refiere a la alternativa que se tiene para reanudar la función del activo al ocurrir una falla.

**Tabla 3. Matriz de ponderación flexibilidad operacional.**

<b><i>Flexibilidad operacional</i></b>	<b><i>Ponderación</i></b>
No hay operación ni repuesto disponible	4
Repuesto disponible en Bogotá	2
Repuesto en el equipo	1

**Fuente:** Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

**Costo de mantenimiento:** Forma de establecer económicamente el impacto en cuanto al costo de mantenimiento generado como consecuencia de la falla.<sup>8</sup>

<sup>8</sup>Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

**Tabla 4. Matriz de ponderación costo de mantenimiento**

<b><i>Criterio (en millones de pesos)</i></b>	<b><i>Ponderación</i></b>
Más de 2 millones y más de 1 día de parada	10
Menos de 2 millones y más de 1 día de parada	8
Más de 2 millones y menos de 1 día de parada	5
Menos de 2 millones y menos de 1 día de parada	3
Parada permitida	1

**Fuente:** Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

**Impacto de seguridad, ambiente e higiene:** Evalúa el impacto ambiental que pueda ocasionar la falla en diferentes aspectos: Seguridad Industrial, Impacto Ambiental e Higiene del sistema productivo.

**Tabla 5. Matriz de ponderación Impacto de seguridad, medio ambiente e higiene**

<b>Criterio</b>	<b>Ponderación</b>
Afecta la seguridad humana tanto externa como interna y requiere la notificación a entes externos de la organización	10
Afecta el ambiente / instalaciones	8
Afecta las instalaciones causando daños severos	5
Provoca daños menores (ambiente – seguridad)	3
No provoca ningún tipo de daños a personas, instalaciones o al ambiente	1

Fuente: Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

### **2.3.8. Evaluación de criticidad**

Estos factores son evaluados por el grupo multidisciplinario (operaciones, mantenimiento, CSMS, compras), una vez sean evaluados todos los criterios de la evaluación se toman los valores de frecuencia y de consecuencia y se exponen en la matriz de criticidad (ver gráfico 7), esta nos permite jerarquizar los sistemas en tres tareas.

- Área de sistema **no crítico (NC)**.
- Área de sistema de **media criticidad (MC)**.
- Área de sistemas **críticos (C)**.

**Figura 4. Matriz de criticidad**

F r e c u e n c i a	4	SC	SC	C	C	C	C
	3	SC	SC	SC	C	C	C
	2	NC	NC	SC	SC	C	C
	1	NC	NC	NC	SC	SC	C
		10	20	30	40	50	60
		<b>Consecuencia</b>					

**Fuente:** Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

## 2.4. ANÁLISIS DE MODO Y EFECTOS DE FALLA (AMEF)

El Análisis de Modos y Efectos de Fallas, AMEF, es un proceso ordenado para la identificación de las fallas de un producto, maquina, sistema o proceso de manufactura antes de que estas ocurran o en su defecto detectarlas. El AMEF puede ser considerado como un método analítico que tiene como objetivos principales: Identificar los modos por los cuales los sistemas pueden dejar de cumplir sus funciones (fallas funcionales), identificar las causas (modos de fallas) que provocan las fallas funcionales, evaluar los modos de fallas y las causas asociadas a ellas, determinar las consecuencias de las fallas en el desempeño del sistema e identificar las acciones que podrán eliminar o reducir la oportunidad de que ocurra la falla potencial.

Por lo expresado anteriormente, se deduce que el objetivo básico del AMEF, es encontrar todas las formas o modos en los cuales puede fallar un activo dentro de

la prestación de un servicio, e identificar las posibles consecuencias o efectos de fallo en función de tres criterios básicos para el MCC:

- Seguridad industrial
- Medio ambiente
- Operación.

Para poder cumplir con este objetivo, los grupos de trabajo del MCC, deben realizar el AMEF siguiendo la siguiente secuencia:

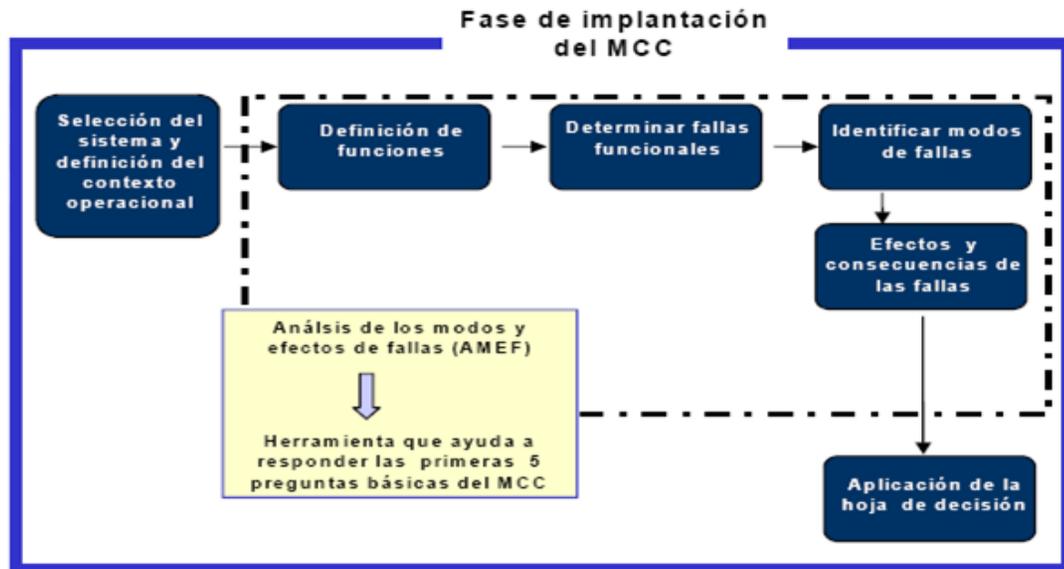
- Explicar las funciones de los activos del área seleccionada y sus respectivos estándares de ejecución.
- Definir los fallos funcionales asociados a cada función del activo.
- Definir los modos de fallos asociados a cada fallo funcional.
- Establecer los efectos o las consecuencias asociadas a cada modo de fallo.

#### **2.4.1. Pasos para la creación del AMEF**

Este procedimiento se realiza únicamente a los equipos que dentro de la evaluación de criticidad se hayan evaluado como “críticos”, debido al costo y dedicación que se requiere por parte del recurso humano, recurso físico y tiempo necesario, este documento se diseña (ver figura 5.) en base a cuatro columnas básicas que son:

- Función estándar
- Falla funcional
- Modo de falla
- Efecto de falla

Figura 5. Flujo de implementación del AMEF



**Fuente:** Parra, Carlos. “Implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad en un sistema de producción”. Universidad de Sevilla, Sevilla – España, 2005

#### 2.4.2. Beneficios del AMEF

La eliminación de los modos de fallas potenciales tiene beneficios tanto a corto como a largo plazo. A corto plazo, representa ahorros de los costos de reparaciones, las pruebas repetitivas y el tiempo de paro. El beneficio a largo plazo es mucho más difícil medir puesto que se relaciona con la satisfacción del cliente con el servicio y con su percepción de la calidad; esta percepción afecta las futuras solicitudes de servicios y es decisiva para crear una buena imagen de los mismos.

#### 2.5. INDICADORES DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

La función del mantenimiento busca en términos generales reducir la probabilidad de falla y/o minimizar las consecuencias de las fallas, al mismo tiempo que

recuperar rápidamente la operatividad del equipo después de ocurrida una falla e incrementar la continuidad operacional del mismo.

Para determinar los valores correspondientes a los indicadores, se dispone de fórmulas matemáticas y herramientas como software especializados. La información necesaria para elaborar el cálculo de éstos indicadores son en general los reportes mantenimiento correctivo realizado a los equipos, parámetros importantes como: tiempos operacionales, tiempos fuera de servicio y tiempos para reparar. Dicha información es la que nos va a proporcionar valores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad para cada uno de ellos, a continuación se presenta los modelos matemáticos para el cálculo de datos claves para hallar dichos índices, en la figura 6 se observan de manera clara la representación de cada tiempo.

**Tiempo operacional (TO):** Es el tiempo en el cual el activo se encuentra en condiciones operativas sin presentar falla, el tiempo promedio operacional (TPO) es la sumatoria de los tiempos operacional del equipo en un periodo de tiempo estimado, entre el número de fallas presentadas durante el mismo periodo, se calcula:

$$\text{TPO} = \sum_{i=1}^n \frac{\text{TO}_i}{\# \text{DEFALLAS}} \quad \text{Ec (1)}$$

**Tiempo fuera de servicio (TFS):** Es el tiempo en el cual el activo permanece en condiciones no operativas como consecuencia de una falla, el tiempo promedio fuera de servicio (TPFS) es la sumatoria de los tiempos fuera de servicio del equipo en un periodo estimado, entre el número de fallas presentadas en el mismo periodo, se calcula:

$$TPFS = \sum_{i=1}^n \frac{TFS_i}{\# DEFALLAS} \Rightarrow TPFS = TPPR + TPFC \quad \text{Ec (2)}$$

**Tiempo entre fallas (TEF):** Es el tiempo que transcurre entre el momento en el cual se presenta la falla 1 y la falla 2 (TFS1+TO2), el tiempo promedio entre fallas (TPEF) es la sumatoria entre los tiempos entre fallas por un periodo estimado, entre el número de fallas presentadas en el mismo periodo, se calcula:

$$TPEF = \sum_{i=1}^n \frac{TEF_i}{\# DEFALLAS} \Rightarrow TPEF = TPO + TPFS \quad \text{Ec (3)}$$

**Tiempo para reparar (TPR):** Es el tiempo empleado para la reparación del equipo, sin contar el tiempo perdido por búsqueda de repuesto y logística, es decir, el tiempo efectivo utilizado en la reparación del equipo, el tiempo promedio para reparar (TPPR) es la sumatoria de todo el tiempo utilizado en el activo para su reparación en un tiempo determinado, entre el número de fallas que haya presentado en el mismo periodo<sup>9</sup>, se calcula:

$$TPPR = \sum_{i=1}^n \frac{TPR_i}{\# DEFALLAS} \quad \text{Ec (4)}$$

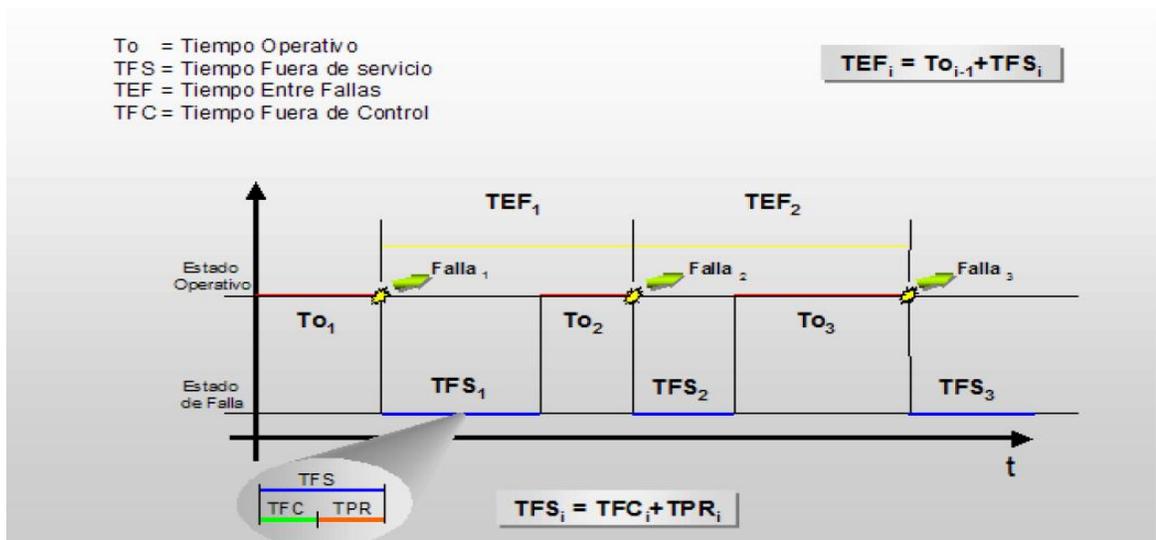
**Tiempo fuera de control (TFC):** Es el tiempo perdido durante la búsqueda de un repuesto o de logística empleado para aportar a la solución de la reparación o de la corrección de la falla, el tiempo promedio fuera de control (TPFC) es la sumatoria de los tiempos fuera de control en un periodo determinado, entre el número de fallas presentado en el mismo periodo, se calcula:

$$TPFC = \sum_{i=1}^n \frac{TFC_i}{\# DEFALLAS} \quad \text{Ec (5)}$$

<sup>9</sup> Moubray, John. "RCM II: Reliability Centered Maintenance". Industrial Press Inc. New York – USA. 1991.

La figura "representación gráfica de los tiempos", sirve como ayuda para identificarlos, comprenderlos y ubicarlos dentro del contexto operativo.

**Figura 6. Representación gráfica de los tiempos**



**Fuente:** Parra, Carlos. "Índices técnicos de gestión del mantenimiento". Universidad de Sevilla, Sevilla - España, 2005

### 2.5.1. Indicadores Básicos

Los mecanismos de control dentro de un proceso productivo al cual se desea aplicar la metodología del RCM se basa fundamentalmente en tres indicadores<sup>10</sup>:

- Confiabilidad  $R(t)$
- Mantenibilidad  $M(t)$
- Disponibilidad  $A$

<sup>10</sup>Balbir S. Dhillon, "Engineering Reliability: New techniques and applications".New York – USA. 1981.

**2.5.1.1. Confiabilidad (R(t)):** La confiabilidad puede definirse como la probabilidad de que un equipo cumpla una misión específica bajo condiciones de operación determinadas en un periodo determinado.

La confiabilidad se relaciona básicamente con la cantidad de fallas y con el tiempo promedio operacional (TPO), de este modo, la confiabilidad de un equipo es inversamente proporcional a las fallas del mismo. Cuando en un equipo no se han presentado fallas, quiere decir que su confiabilidad es de 100% o que tiene una probabilidad de supervivencia igual a 1.

La confiabilidad se calcula por medio de software especializado o mediante las siguientes recomendaciones:

- **Cálculo de confiabilidad según Weibull:** De forma práctica la aproximación de la expresión más utilizada para calcular la confiabilidad de un equipo mecánico o un componente mecánico, es la desarrollada a partir de la distribución de Weibull<sup>11</sup>:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{v}\right)^\theta} \quad \text{Ec (6)}$$

Donde:

**R (t):** Confiabilidad del equipo.

**t:** Intervalo de tiempo en el cual se desea conocer la confiabilidad del equipo, partiendo de un período de tiempo = 0.

**V:** Vida característica, se calcula en función del tiempo promedio operacional: TPO (se puede utilizar el modelo de los mínimos cuadrados para calcular V), en los casos donde no se pueda modelar V, se puede utilizar directamente TPO, con un porcentaje de error comprendido entre el 5% y el 10%.

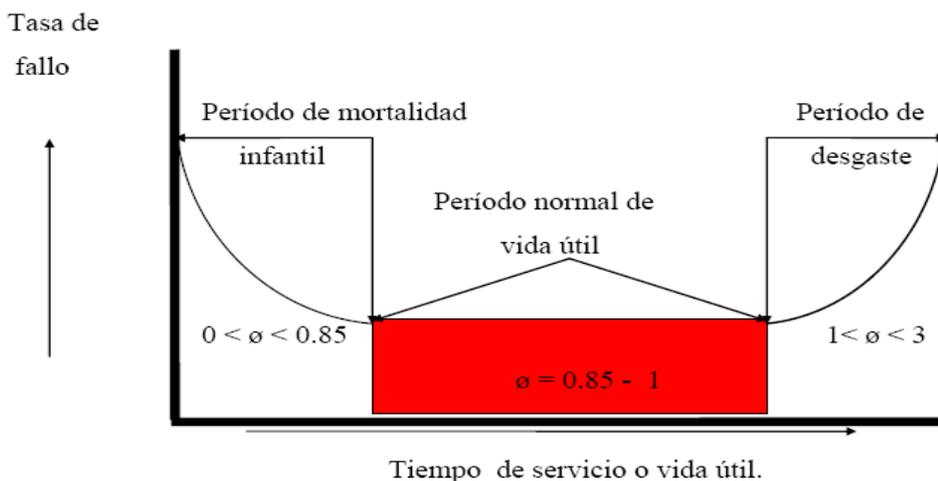
**$\theta$ :** Es el parámetro de forma que según la distribución de weibull, relaciona el periodo de tiempo en el que se encuentra operando el equipo y el comportamiento del mismo ante la probabilidad de ocurrencia de fallos y sus valores son:

$0 < \theta < 0,85$ , el equipo está en etapa de mortalidad infantil, al inicio de la vida útil.

$\theta = 0,85 - 1$ , el equipo se encuentra en etapa mortal de vida útil.

$1 < \theta < 3$ , el equipo se encuentra en la etapa de desgaste, valores de  $\theta$  por arriba de 1, indican que el equipo está comenzando a desgastarse, valores de  $\theta$  por arriba de 2, indican que el equipo se ha desgastado incrementándose el número de fallos en el mismo (el periodo de vital útil del equipo está llegando a su fin).

**Figura 7. Curva de la “bañera”**



**Fuente:** O'Connor. "Practical reliability engineering". P.D.T. Tercera edición. Wiley – Interscience Publication. New York – USA. 1984

**Cálculo de confiabilidad exponencial:** En el caso de los equipos eléctricos o de los componentes electrónicos la distribución que más se ajusta al comportamiento de estos equipos es la distribución exponencial. La expresión utilizada para calcular la confiabilidad de un equipo en un tiempo determinado de operación, a partir de la distribución exponencial es la siguiente<sup>3</sup>:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

**R (t):** Confiabilidad del equipo en un valor probabilístico.

**t:** Intervalo de tiempo en el cual se desea conocer la confiabilidad del equipo, partiendo de un período de tiempo = 0.

$\lambda$  : Tasa de fallos del equipo = número de fallas /  $\Sigma$  tiempo operacional

$\lambda$  : Número de fallas /  $\Sigma$ TO

**2.5.1.2. Disponibilidad (A):** Se define como el tiempo en que un sistema puede entrar en operación, puede expresarse como la proporción de tiempo que un equipo se encuentra apto para cumplir su misión.

La disponibilidad relaciona los tiempos de reparación de las fallas y los tiempos operacionales.

$$A_o = \frac{TPO}{TPO + TPFS} * 100\% \quad \text{Ec (8)}$$

A, considera el diseño del equipo, la disponibilidad del personal de mantenimiento, las políticas y procedimientos de mantenimiento y los factores no tomados en cuenta en el diseño de los equipos. La ecuación 8 es utilizada, cuando la gestión

<sup>12</sup>Balbir S. Dhillon, "Quality Control, Reliability and Engineering Design". Industrial Engineering. New York – USA. 1985.

de mantenimiento no tiene bien definidos ni los tiempos de reparación (TPR), ni los tiempos relacionados con la logística del mantenimiento (TFC).<sup>12</sup>

**2.5.2.3. Mantenibilidad (M (t)):** La mantenibilidad de un equipo es la probabilidad de que éste pueda ser puesto en condiciones operacionales en un periodo de tiempo dado cuando el mantenimiento es ejecutado de acuerdo con procedimientos preestablecidos.

La probabilidad de que un equipo pueda ser reparado (TPPR) se define mediante la fórmula:

$$TPPR = \frac{\sum TPR}{N^{\circ} Fallas} \quad \text{Ec (9)}$$

## **2.6. (LIFE-CYCLE COST, LCC) ANÁLISIS COSTO/EFFECTIVIDAD**

Es un sistema bajo el cual se trata de satisfacer necesidades identificadas y/o cumplir con ciertos objetivos definidos. La efectividad o eficacia es el generado en el que se cumplen dichas necesidades y objetivos. Ahora bien, esa satisfacción implica para el usuario un coste total a lo largo del sistema, producto o estructura dados, conocido como Costo de Ciclo de Vida (Life-CycleCost, LCC).

Por lo anterior, se deben considerar simultáneamente tanto el costo como la efectividad, durante el diseño y el desarrollo del sistema.<sup>13</sup>

<sup>13</sup>Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997. Se pueden relacionar decisiones tomadas durante las primeras etapas del diseño del sistema como parte importante del costo de ciclo de vida para un producto. Tales decisiones van enfocadas a criterios de tipo operativo, factores de

prestaciones y efectividad, configuraciones del diseño, conceptos de mantenimiento, cantidad de producción, factores de utilización, apoyo logístico y eliminación.

El proceso de evaluación del costo y la efectividad tuvo su origen en la evaluación económica de sistemas complejos espaciales y de defensa, su predecesor fue el análisis costo-beneficio que se originó en el sector civil de la economía y se remonta a la Ley de Control de Inundaciones de 1936 en los Estados Unidos. Gran parte de la filosofía de Costo-Efectividad viene originalmente del análisis Costo-Beneficio debido a lo cual existe similitud.

### **2.6.1. Metodología.**

Para aplicar la metodología del análisis de Costo-Efectividad y comparar diseños alternativos de sistemas complejos, se deben satisfacer tres requisitos:

- **Primero:** los sistemas evaluados deben tener los mismos objetivos y los mismos propósitos. (Barcos y aviones para transportar personal y equipo)
- **Segundo:** Se deben establecer criterios de evaluación para factores de interés, técnicos y no técnicos.
- **Tercero:** Se debe disponer de la mayoría de detalles de los sistemas que están siendo evaluados y si no se deben estimar para poder predecir el comportamiento de los componentes y el coste y efectividad de los sistemas.<sup>14</sup>

<sup>14</sup>Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997. Para el caso del traslado de un personal a una región para desarrollar una labor en la cual tienen que utilizar un determinado equipo, como primer paso de deben asegurar los objetivos para satisfacer dicha misión. Cada sistema de envió debe

tener la capacidad de tener la capacidad de trasladar un conjunto de personal y equipo que cumpla con los requisitos de la misión.

Realizar una comparación entre aviones que puedan trasladar únicamente personal y barcos que puedan llevar tanto personal como equipo no sería válido en un estudio de costo-efectividad.

Cuando ya se han identificado los requisitos de la misión se deben desarrollar los conceptos y diseños de sistemas alternativos, si solo se puede concebir un sistema, el único uso que tendrá la evaluación de costo-efectividad será para establecer una comparación con una capacidad ya existente. Se deberá hacer la selección con base en una configuración óptima de cada sistema alternativo utilizando el método de evaluación económica.

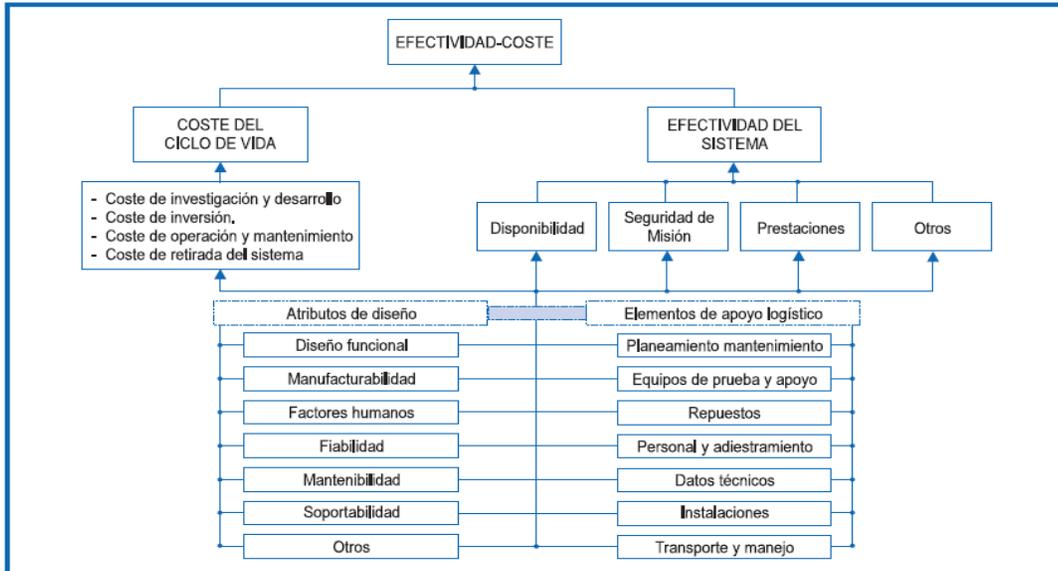
Para el segundo paso los criterios de evaluación deben seleccionarse comparando los aspectos de ciclo de vida como los de efectividad de todos los sistemas a evaluar. Los criterios se muestran en el Grafico8, normalmente existe mayor facilidad para establecer los criterios de costo que los de efectividad, no por esto se indica que la estimación del costo sea sencilla.<sup>15</sup>

Entre las distintas categorías del costo están las que surgen a lo largo del ciclo de vida del sistema. Incluyen costos asociados a la investigación y desarrollo, la ingeniería, el diseño, la operación, la producción, el mantenimiento como se muestra en la parte inferior izquierda del Figura 8.

<sup>15</sup>Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997 Los criterios de efectividad de los sistemas presentan mayor dificultad y cuando los sistemas tienen múltiples objetivos esto incrementa la dificultad. Algunas categorías definidas son: aptitud, provecho, beneficio y ganancia. Estas

características son difíciles de cuantificar por lo que usualmente se utilizan criterios como disponibilidad, movilidad, mantenibilidad y fiabilidad, entre otros.

**Figura 8. Criterios “Costo-Efectividad”**



Fuente: Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997

Aunque nos e disponga de bases de medida cuantitativas precisas, estos criterios son útiles para la descripción de efectividad del sistema.

En el estudio de costo-efectividad se deben analizar los sistema de acuerdo con sus cualidades lo que se puede hacer ordenando los sistemas de acuerdo a su capacidad para establecer los criterios más importantes. En el caso anteriormente expuesto sobre el traslado de personal a una región, el criterio en el caso de logística es la cantidad de personal, el peso del equipo en un intervalo de tiempo especificado, este criterio será el principal. Otros criterios como la mantenibilidad ocuparían el segundo lugar, por medio de este procedimiento se eliminaran los

candidatos menos prometedores. Los candidatos que permanezcan se someterán a un análisis de costo-efectividad más detallado.

Si el costo como la efectividad de una alternativa son superiores a los valores respectivos de las demás opciones evaluadas la elección se vuelve obvia.

Si los valores de dos alternativas son idénticos y no existe una diferencia significativa en costo se puede considerar cualquiera de las dos de acuerdo con esa irreductibilidad y finalmente si tanto el costo como la efectividad difieren significativamente, la selección debe realizarse basándose en la intuición y el buen juicio.

El paso final del estudio costo-efectividad incluye documentar su finalidad, hipótesis, metodología y conclusiones. Es el paso de comunicación a terceras personas y no debe tratarse con ligereza. Pueden ser útiles las presentaciones para la evaluación de dicha decisión.

### **2.6.2. Problemas de diseño tradicional.**

El diseño en la ingeniería tradicional se ha centrado principalmente en la fase de adquisición de ciclo de vida, sin embargo la experiencia reciente indica que no puede obtenerse un producto o sistema adecuadamente coordinado, operado y que sea competitivo en el mercado, mediante acciones aplicadas mucho después de haber sido creado, es vital que como ingenieros contemplemos la viabilidad operativa durante las primeras etapas del desarrollo del producto y que se asuma la responsabilidad del cálculo de costo de ciclo de vida.

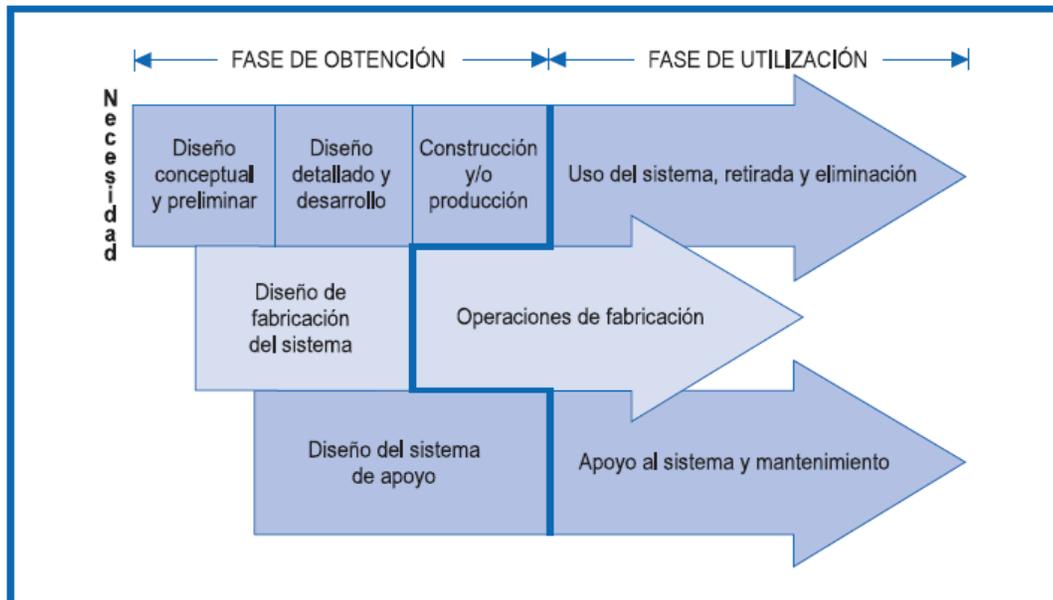
A menudo el diseño se considera bueno cuando cumple la función principal para la cual fue creado pero esto trae consigo efectos secundarios en forma de problemas operativos, esto se debe al no abordar el problema más exigente del diseño que

corresponde a los criterios de la efectividad (mantenibilidad, confiabilidad, soportabilidad, fiabilidad, entre otros) Se dispone de un conocimiento especializado suficiente para resolver esta dificultad. Lo que no se tiene es la sistematización del uso integrado de lo que se conoce.

Existe una capacidad de integración de las consideraciones económicas dentro del campo de la economía aplicada a la ingeniería. En la figura 9 se ilustran cada uno de estos ciclos de vida y las condiciones más importantes asociadas con sus fases.

Las consideraciones económicas son una base importante en la integración de los ciclos de vida del producto, la producción y el apoyo.

**Figura 9. Ciclos de Vida Producción, Proceso y Apoyo.**



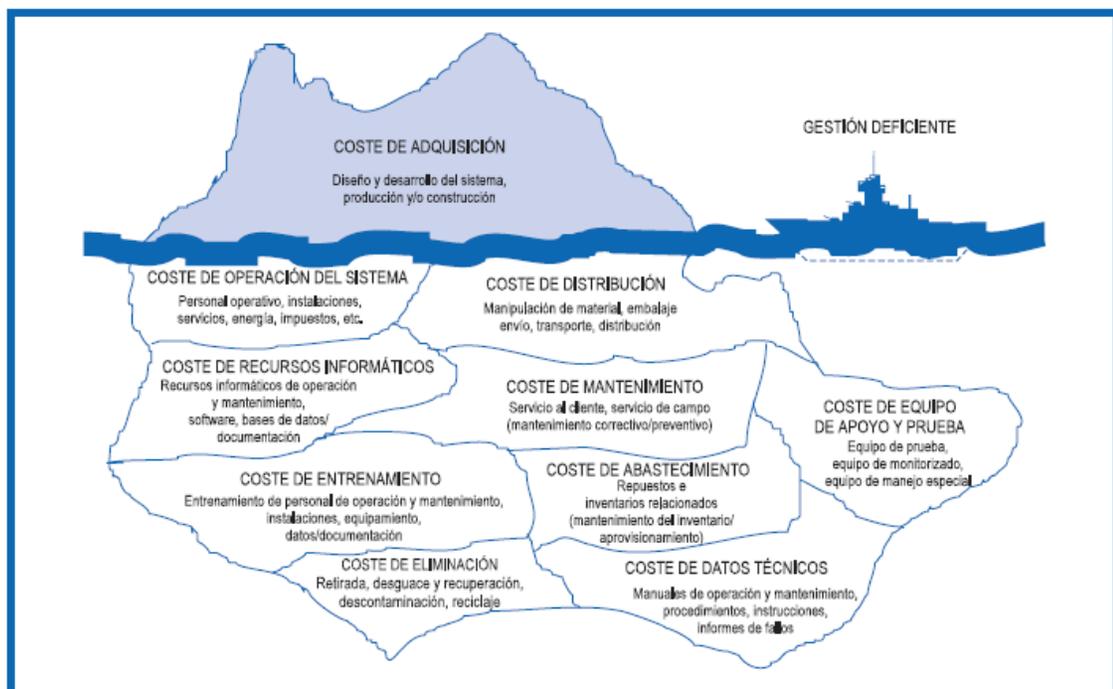
Fuente: Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997

### 2.6.3. Problemas de Visibilidad del Costo.

Son varios los factores que afectan la visibilidad del costo, entre ellos están la inflación creciente, reducción del poder adquisitivo, limitaciones de presupuesto, aumento de la competencia, entre otros. Se ha generado inquietud e interés acerca del costo total de productos, sistemas y estructuras. La identificación del costo se ve afectada también por otras anomalías comunes para la visualización real de los datos, entre estas están:

- El costo total del sistema no es visible, en particular aquellos costos asociados con la operación y apoyo del sistema. El problema de visibilidad del costo se debe al efecto “Iceberg” como muestra la figura 10

**Figura 10. El problema de la visibilidad del costo total.**



Fuente: Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997

- A menudo los factores de costo se aplican incorrectamente, los costos individuales se identifican mal y muchas veces se incluyen en la categoría equivocada; los costos variables se tratan como fijos (y viceversa), los costos directos se tratan como indirectos.
- Los procedimientos contables no siempre permiten una evaluación realista y oportuna del costo total.
- Muchas veces las prácticas presupuestales son inflexibles con respecto al cambio de fondos de una categoría a otra o de un año a otro, para hacer más real y oportuna la identificación del costo.<sup>16</sup>

<sup>16</sup>Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997

Para evitar este efecto “Iceberg” los estudios de viabilidad económica deben abordar todos los aspectos de ciclo de vida, a pesar de que existen plataformas (ERP) que manejan dichas módulos, no se socializa el conocimiento, estas plataformas de información son robustas y a su vez son moldeables pero los métodos de implementación por parte de las empresas consultoras no son adecuados y el conocimiento de las empresas que ofrecen los software de sus clientes hacen que se comentan errores que se corrigen cuando ya han ocasionado un gran daño, estas herramientas apoyadas en sistemas no sirven para anticipar condiciones que afectaran la viabilidad de las diferentes alternativas.

**2.6.3.1. Factores que contribuyen al crecimiento del costo:** No solo aumentan los costos de adquisición asociados a los nuevos sistemas, sino que también lo hacen de forma rápida los costes de operación y mantenimiento de los sistemas ya en uso. Esto es debido principalmente a una combinación entre los factores de aumento de la inflación y el costo debido a:

- Poca exactitud en las estimaciones, predicciones y previsiones.
- Cambios de ingeniería durante el diseño y desarrollo.

- Cambios en la producción y/o construcción del sistema.
- Cambios durante la adquisición de componentes del sistema.
- Calidad deficiente de los productos y sistemas durante su uso.
- Cambios en la capacidad de apoyo logístico.
- Contratiempos y problemas imprevistos.

**2.6.3.2. Calculo del costo de las funciones de ciclo de vida:** El costo de ciclo de vida se determina identificando las funciones aplicables en cada una de sus fases, calculando el costo de estas funciones y aplicando los costos apropiados durante toda la extensión del ciclo de vida. Para que este completo, el estudio de ciclo de vida debe incluir todos los costos de fabricante y del consumidor. A continuación se nombran varias de las características de los costes en las distintas fases del ciclo de vida del sistema o producto:

**Diseño conceptual del sistema:** las magnitudes de las características determinantes del coste, de acuerdo con lo que se va a diseñar, probar o producir (o construir) y apoyar el sistema o producto, deben establecerse en las etapas iniciales de planificación y diseño conceptual del sistema, cuando se están definiendo los requisitos. Se puede adoptar un objetivo de «diseño según el coste» (Design-To-Cost, DTC) a fin de establecer el coste como restricción del diseño del sistema o producto, al igual que las prestaciones, efectividad, capacidad, precisión, tamaño, peso, fiabilidad, mantenibilidad, soportabilidad, entre otros.

El coste debe ser un factor activo más que una consecuencia del proceso de diseño conceptual del sistema. Debido al tamaño de la estimación del costo durante la formulación del concepto, normalmente se usan métodos paramétricos al mismo tiempo que el buen juicio de los expertos.

**Diseño preliminar del sistema:** una vez establecidos los requisitos cuantitativos del coste, el siguiente paso incluye establecer un proceso análisis repetitivo

contemplando las mejores opciones para llegar a la mejor elección del sistema o producto. Los criterios definidos en el diseño conceptual del sistema se asignan o reparten inicialmente entre los diversos segmentos del sistema, a fin de establecer las pautas para el diseño y/o adquisición de los elementos necesarios. La asignación se realiza a nivel de sistema y se desciende posteriormente hasta el nivel necesario para suministrar los datos de entrada del diseño, así como para asegurar un control adecuado.

A medida que evoluciona el desarrollo del sistema, se consideran diversos métodos que puedan conducir a seleccionar una configuración de preferencia.

Se realizan análisis del coste del ciclo de vida evaluando cada posibilidad, con el fin de asegurar que la opción seleccionada es compatible con los objetivos establecidos de coste, y de determinar cuál de los distintos candidatos considerados es el preferible desde un punto de vista global de costo-efectividad.

Como paso siguiente se realizan estudios de compromiso, utilizando el análisis del costo del ciclo de vida como una herramienta de evaluación, hasta que se elige una configuración de diseño de preferencia. Se justifican las áreas de cumplimiento y se descartan las soluciones que no cumplen los requisitos. Este es un proceso iterativo con realimentación activa y acción correctiva.

**Diseño detallado y desarrollo:** conforme el diseño del sistema o producto se refina con más profundidad y se dispone de datos del diseño, el proceso de análisis del coste del ciclo de vida va implicando la evaluación de características específicas del diseño (como reflejan la documentación del diseño y los modelos de ingeniería o prototipos), la predicción de fuentes generadoras de coste, la estimación de costes y la proyección del coste del ciclo de vida a fin de establecer el perfil del coste del ciclo de vida (Life-Cycle, Cost Profile, LCCP). Los resultados se comparan con el requisito inicial y se toma una acción correctiva según sea

necesario. De nuevo, esto es un proceso iterativo, pero a nivel inferior que el que se alcanzaba durante el diseño preliminar del sistema.

**Producción, uso y apoyo:** Los aspectos de coste en las etapas de producción, uso, apoyo y, retirada y eliminación en el ciclo de vida del sistema o producto, se abordan mediante la recogida y el análisis de datos, y una función de evaluación de los mismos. Se identifican los determinantes de costes elevados, se definen las relaciones causa-efecto, y se obtiene y utiliza una información valiosa a efectos de la mejora del producto, mediante un nuevo diseño o un nuevo estudio de ingeniería. El objetivo es hacer estimaciones realistas de estos costes «aguas abajo» como ayuda en la evaluación del diseño.<sup>17</sup>

<sup>17</sup>Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997

**2.6.3.3 Estructura de desglose del costo:** En general, los desgloses del costo a lo largo del ciclo de vida se dividen en categorías, de acuerdo con la actividad organizativa necesaria para concebir el sistema. Estas categorías y sus elementos constituyentes componen una estructura de desglose o descomposición del coste (Cost BreakdownStructure, CBS) como ilustra la figura 11.

Las categorías del costo son:

**Costo de investigación y desarrollo:** planificación inicial, análisis de mercado, investigación del producto, análisis de requisitos, diseño de ingeniería, datos y documentación de diseño, «software», pruebas y evaluación de los modelos de ingeniería, y funciones de gestión asociadas.

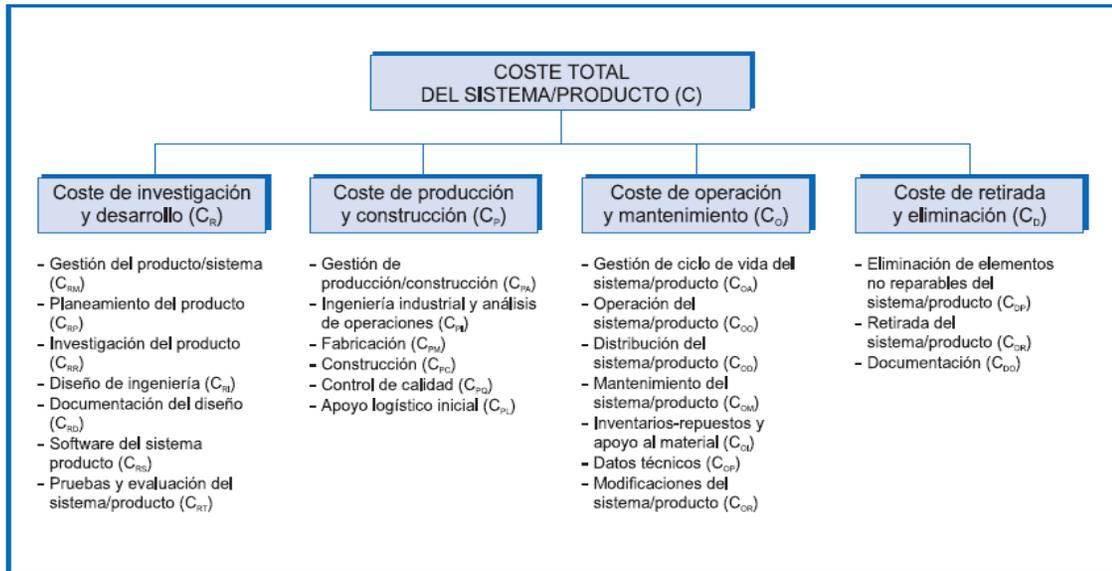
**Coste de producción y construcción:** ingeniería industrial y análisis de operaciones, producción (fabricación, montaje y pruebas), construcción de

instalaciones, desarrollo del proceso, operaciones de producción, control de calidad y requisitos iniciales de apoyo a la logística (por ejemplo, apoyo inicial al cliente, producción de repuestos, producción de

**Coste de operación y apoyo:** operaciones del sistema o producto por parte del consumidor o usuario, distribución del producto («marketing» y ventas, transporte y gestión de tránsito), y mantenimiento y apoyo logístico durante el ciclo de vida del sistema o producto (por ejemplo, servicio al cliente, actividades de mantenimiento, apoyo de abastecimiento, equipos de prueba y apoyo, transporte y manejo, datos técnicos, instalaciones, modificaciones del sistema entre otros.

**Coste de retirada y eliminación:** eliminación de elementos no reparables a lo largo del ciclo de vida, retirada del sistema o producto, reciclaje de material y requisitos aplicables del apoyo logístico. La estructura de desglose del coste relaciona los objetivos y actividades con los requisitos de recursos de organización. Constituye una subdivisión lógica del coste por área de actividad funcional, elementos importantes del sistema, y/o una o más de las clases discretas de elementos comunes o semejantes. La CBS proporciona un medio para la asignación inicial de recursos, la vigilancia del coste y el control del coste.

**Figura 11. El problema de la visibilidad del costo total.**



Fuente: Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997

**Coste de retirada y eliminación:** eliminación de elementos no reparables a lo largo del ciclo de vida, retirada del sistema o producto, reciclaje de material y requisitos aplicables del apoyo logístico. La estructura de desglose del coste relaciona los objetivos y actividades con los requisitos de recursos de organización. Constituye una subdivisión lógica del coste por área de actividad funcional, elementos importantes del sistema, y/o una o más de las clases discretas de elementos comunes o semejantes. La CBS proporciona un medio para la asignación inicial de recursos, la vigilancia del coste y el control del costo.<sup>18</sup>

<sup>18</sup>Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997

#### **2.6.3.4. Estimación de los elementos del costo.**

Una estimación del coste es una opinión basada en el análisis y el buen juicio sobre el coste de un producto, sistema o servicio. Esta opinión puede alcanzarse de manera formal o informal mediante varios métodos que asumen que la experiencia es una buena base para predecir el futuro. En muchos casos, la relación entre la experiencia pasada y el resultado futuro es bastante directa y obvia; en otros casos es confusa, debido a que el producto, sistema o servicio propuesto difiere de sus predecesores de forma significativa. El reto consiste en proyectar desde lo conocido hasta lo desconocido, utilizando la experiencia adquirida con entidades existentes. Las técnicas usadas para la estimación del coste varían desde la intuición en un extremo, hasta el análisis matemático detallado en el otro.

**Estimación mediante procedimientos de ingeniería:** la estimación mediante procedimientos de ingeniería implica el examen de segmentos aislados con un nivel profundo de detalle. El estimador comienza con un diseño completo y especifica cada tarea de producción o construcción, el equipo y herramientas necesarias, y los requisitos de material. Después se asignan costes a cada elemento, con el mayor nivel de detalle. Por fin, se combinan esos costes para obtener un total para producto y sistema. Existen tablas preestablecidas de tiempos de las operaciones de producción para muchas tareas corrientes. Han sido establecidas normalmente por ingenieros de la industria y constituyen el tiempo mínimo necesario para completar una determinada tarea, empleando una capacitación normal del operario y unas herramientas corrientes. La aplicación de estas tablas es óptima en el caso de procedimientos de estimación de ingeniería en los que se considera una serie grande y estable de elementos idénticos de producción. No suelen ser útiles cuando se lleva a cabo la estimación de sistemas complejos en los que se va a fabricar sólo un elemento de cada tipo. Por ejemplo, las series de los sistemas militares y espaciales avanzados son habitualmente

pequeñas, con una evolución constante y rápida de su configuración de diseño y de sus requisitos de producción.

**Estimación por analogía:** Cuando una empresa entra en una nueva área, puede ser muy eficaz la estimación por analogía.

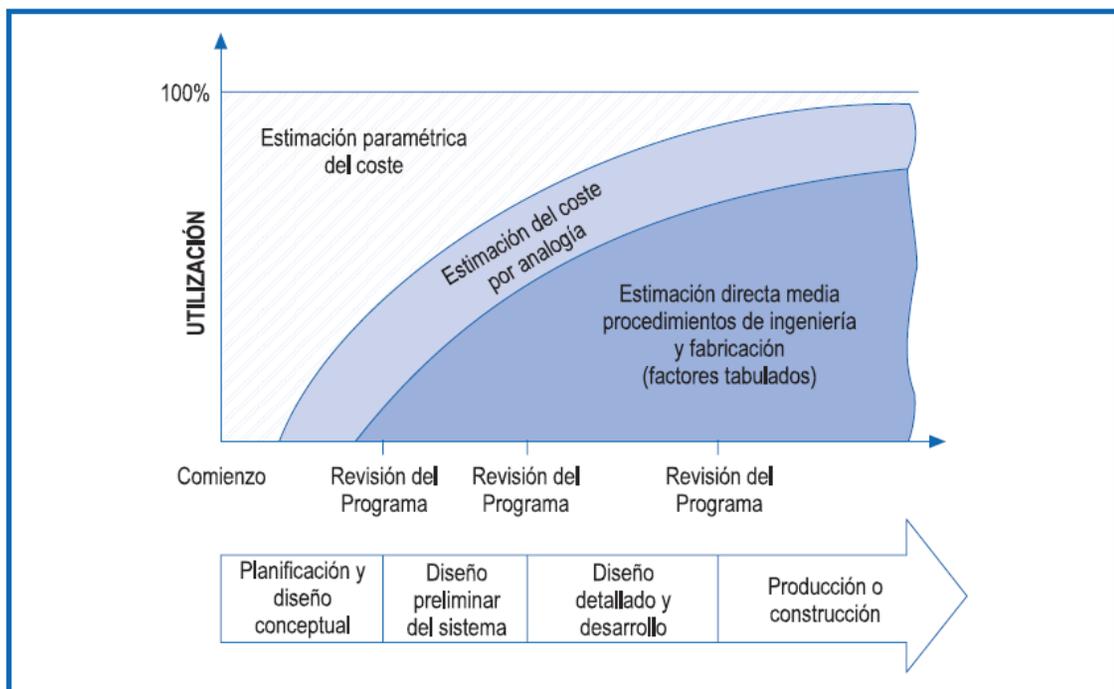
Por ejemplo, las industrias aeronáuticas que competían en programas de misiles en los años 50 establecieron analogías entre aviones y misiles como base para la estimación. Se realizaron los ajustes apropiados en lo que se refiere a las diferencias de tamaño, número de motores y prestaciones.

La estimación por analogía puede darse también a nivel microscópico. Las horas de mano de obra directa necesarias para fabricar un componente pueden estimarse recurriendo a las horas que fueron necesarias para trabajos similares. La base para la estimación es la similitud que existe entre el elemento conocido y la pieza propuesta. Algunos estimadores con experiencia, tales como mecánicos, fabricantes de herramientas o técnicos, pueden estimarlos tiempos necesarios con mucha precisión. Por tanto, se les suele consultar cuando se necesita una estimación rápida. Figura 12.

**Métodos paramétricos de estimación:** El método paramétrico de estimación del coste puede usar técnicas estadísticas que varían desde un simple ajuste gráfico de curvas hasta un análisis de correlación múltiple. En cualquier caso, el objetivo es encontrar una relación funcional entre los cambios en el coste y el factor o factores de los que depende el coste, como la tasa de producción, el peso, el tamaño del lote<sup>19</sup>, entre otros.

<sup>19</sup>Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997 Aunque las técnicas paramétricos de estimación del coste son las preferidas en la mayoría de las situaciones, hay casos en que son precisos los métodos de ingeniería o la estimación por analogía porque no existen datos con una base histórica sistemática. El producto puede utilizar algunos métodos de fabricación nuevos poco conocidos, invalidando así el uso estadístico de datos de un artículo producido con anterioridad.<sup>20</sup>

**Figura 12. Métodos de estimación según las fases.**



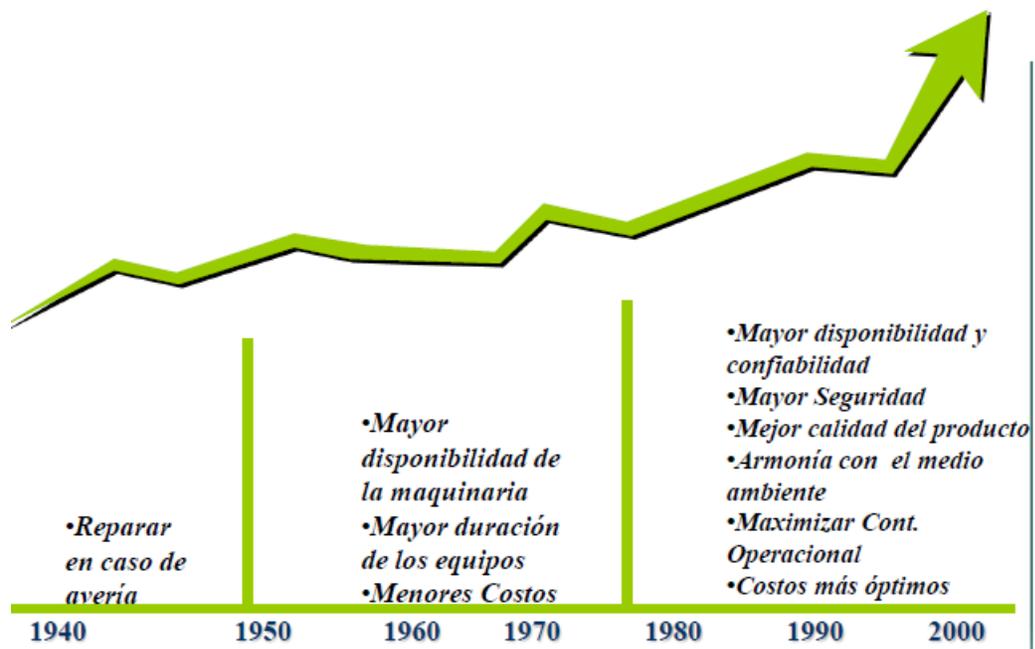
Fuente: Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997

<sup>20</sup>Fabrycky J. Wolter. Traducción Joaquín Teigeiro. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Publicaciones de Ingeniería Primera Edición Traducción 1997

### 3. EVOLUCION DEL MANTENIMIENTO

La evolución del mantenimiento se divide en tres etapas; la primera inicia en la segunda guerra mundial en la cual el mantenimiento actúa por avería en los equipos y en la que no se requiere de grandes habilidades por parte del personal técnico. En la segunda impera el mantenimiento preventivo y la reducción de costos al prolongar la vida útil de los equipos, el tercer periodo en el que predomina la confiabilidad y disponibilidad de equipos con mayores niveles de seguridad para al alcanzar lo mayores niveles de eficiencia.

Los estudios de fiabilidad permiten llegar a niveles de optima confiabilidad que producen mínimos costos de ciclo de vida para el usuario y minimizar los costos de fabricante sin comprometer la confiabilidad y la calidad (Reliasoft ® 2008).



### **3.1 MODELO UNIVERSAL E INTEGRAL, PROPUESTO PARA LA MEDICIÓN DEL CDM.**

Los elementos mantenimiento producción y maquinas se relacionan entre si a partir de premisas y normas de aceptación universal, así: la relación entre producción y máquina.

La confiabilidad, se mide a partir del número y la duración de las fallas (Tiempos útiles, reparaciones y tareas proactivas), la relación entre mantenimiento y maquinas se rige por las reglas de la mantenibilidad, esta se cuantifica por la cantidad y la duración de la reparaciones y mantenimientos planeados, la relación entre mantenedores y productores se da por una relación indirecta a través de los equipos y está gobernada por la disponibilidad, se mide o se obtiene a través de cálculos y deducciones matemáticas a partir de la confiabilidad y la disponibilidad.

La confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad son prácticamente las únicas medidas técnicas y científicas fundamentadas en cálculos matemáticos y estadísticos y probabilísticos que tiene el mantenimiento para su análisis.

Por medio de la herramienta del CMD es como se puede planear, organizar, dirigir y ejecutar y controlar la gestión del mantenimiento

La ingeniería de confiabilidad entrega herramientas teóricas y prácticas que permiten especificar, proyectar y demostrar la probabilidad y capacidad según la cual componentes productos equipamientos y sistemas desempeñan sus funciones por periodos determinados en ambientes específicos y sin presentar falla.

### 3.2. INTERACCIÓN DEL CMD

La importancia en la metodología del CMD consiste en la capacidad de predecir el comportamiento de sistemas y equipos en cuanto a fallas o reparaciones (tiempos y fechas de ocurrencia), tiempos útiles (duración y días en que ocurrirán), los mantenimientos planeados (para su programación en tiempos y frecuencia) y demás actividades alusivas a la planeación.

La confiabilidad se asocia a fallas, la mantenibilidad a reparaciones y la disponibilidad a la posibilidad de generar servicios y productos.<sup>10</sup>

**Confiabilidad:** es la posibilidad de que un recurso cumpla con una función determinada por un tiempo determinado, se cuantifica según el modelamiento de sus tiempos de falla con el fin de predecir las posibles fallas.

Se calcula con el tiempo operacional o el tiempo hasta la falla:

$$R(t) = 85\%$$

El 15% de las fallas se pueden presentar durante un tiempo "t"

**Disponibilidad:** indica el grado o tiempo que un activo se encuentra fuera de servicio, por estar en mantenimiento: se cuantifica según el tiempo de inspección, diagnóstico y reparación hasta que el equipo se entrega a operaciones.

El tiempo fuera de servicio se calcula:

$$A(t) = 95\% \quad TO = 95 \text{ hrs} \quad TFS = 5 \text{ hr.}$$

**Mantenibilidad:** indica el grado en que un activo o recurso sea fácilmente reparado según: el tiempo intervenido, consecuencia del talento humano en horas/hombre y facilidad de repuestos.

Se calcula con el tiempo por reparación TPR.

$M(t) = 97\%$

$TO + TFS = 97$  hs vs.  $TPR = 3$  hr.

**Tasa de fallas:** es la cantidad de fallas en tiempo o rango determinado.

$\text{Lambda (Lambda)} = \# \text{ de fallas} / \text{TTO}$  (tiempos o rangos determinados).

### 3.3 COMPORTAMIENTO DE LAS FALLAS

El análisis de Confiabilidad requiere una buena comprensión del comportamiento de la tasa de fallas, la mayoría de los productos comenzarán sus vidas con alta tasa de falla y después presentarán una reducción a partir de un determinado punto. La tasa de falla entonces se estabiliza y se mantiene constante durante la vida útil del producto. Con el paso del tiempo el producto envejece, se desgasta y la tasa de falla comienza a aumentar rápidamente con el tiempo.

Se define falla como una incapacidad de cualquier activo de hacer aquello que sus usuarios quieren que haga. 8.

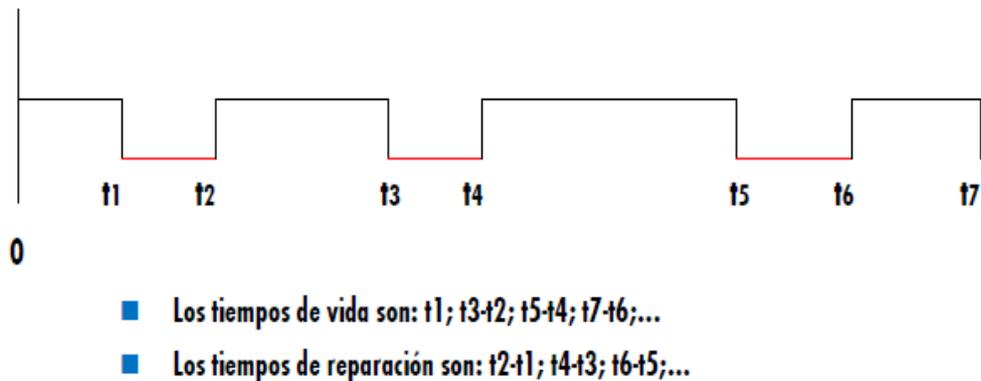
Las fallas se clasifican como críticas, degradantes incipientes y desconocidas dependiendo del efecto que generan sobre el cuerpo, incluyendo:

- **Falla completa:** en esta falla se pierde tanto la función de disponibilidad con funcionalidad.
- **Falla parcial:** sin genera la pérdida total de la función de disponibilidad.
- Falla que se encuentra durante la reparación y los mantenimientos planeados e inspecciones o pruebas que implican realizar otras reparaciones.
- Fallas en aparatos de seguridad o elementos de control y monitoreo.

- La degradación paulatina de la funcionalidad del elemento después de cierto límite establecido como referencia con antelación al hecho.

No se tienen como fallas la relación de tareas planeadas de mantenimiento, ni la interrupción de la funcionalidad de un elemento o maquina causada por factores externos a la operación de dicho elemento.

Los sistemas principales en ingeniería son esos donde algunos componentes fallan, ellos se separan más adelante, fallan otra vez y así sucesivamente. Grafica



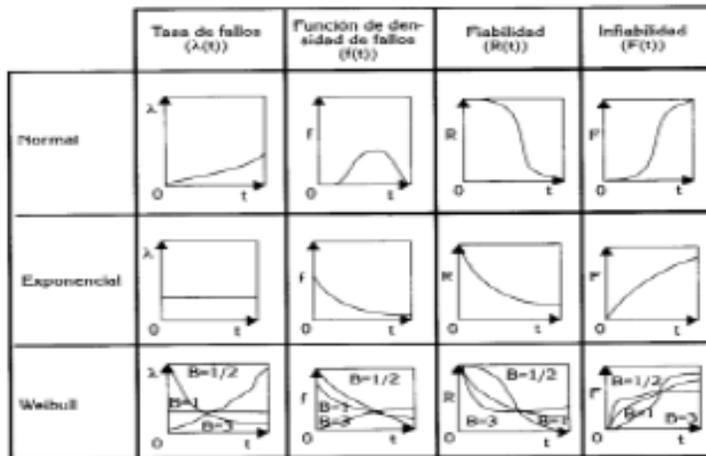
A continuación se muestran los diferentes intervalos de tiempos que hacen parte del proceso operativo y son claves para el modelamiento del CMD:

- ✚ Tiempo entre fallas TEF.
- ✚ Tiempo Operacional TO.
- ✚ Tiempo Fuera de Servicio TFS.
- ✚ Tiempos por Reparación TPR.
- ✚ Tiempos Fuera de control TFC.

### 3.4 MÉTODOS DE PREDICCIÓN

Son regresiones matemáticas en base logarítmica que modelan el comportamiento de las fallas, caracterizando su degradación; con el fin de predecir el grado de afectación en el estándar de función del equipo.

Así mismo en confiabilidad los modelos nos entregan un estimado de la tasa de fallas en función del tiempo. Los más utilizados en ingeniería de confiabilidad, son los modelos probabilísticos basados en distribuciones estadísticas:



- Normal
- Exponencial
- Weibull
- LogNormal
- Gamma

En teoría existe una cantidad infinita de distribuciones de probabilidad diferentes que se utilizan para describir el comportamiento de variables aleatorias, discretas, continua, y mixto.

**La distribución normal:** es comúnmente utilizada en el análisis de confiabilidad, en ciclos hasta la falla de componentes electrónicos y mecánicos, equipamientos o sistemas, para fatiga, para resistencia de materiales y en el proyecto probabilístico con cargas variables.

y el comportamiento de la tasa de fallas en esta distribución puede ser creciente y luego decreciente asintóticamente hacia cero:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

**La distribución Weibull:** es una propuesta general para análisis de confiabilidad, es una distribución muy flexible, y por esta razón ampliamente utilizada; el comportamiento de la tasa de fallas en esta distribución puede ser creciente, decreciente o constante.

La forma más popular y simple de la distribución de Weibull es la Weibull de dos parámetros:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

Distribución Gama Generalizada: posee la capacidad de imitar otras distribuciones como la Weibull o la Lognormal dependiendo de los parámetros de su distribución, este tipo de distribución posee tres parámetros y su pdf es dada por

$$f(t) = \begin{cases} \frac{|\lambda|}{\sigma \cdot t} \cdot \frac{1}{\Gamma\left(\frac{1}{\lambda^2}\right)} \cdot e^{\left[ \frac{\lambda \cdot \frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} + \ln\left(\frac{1}{\lambda^2}\right) - e^{\lambda \frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}}}{\lambda^2} \right]} \\ \frac{1}{t \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right)^2} \quad \text{if } \lambda = 0 \end{cases}$$

### 3.5 PARÁMETROS DE FORMA SEGÚN LA ESTADÍSTICA.

Los parámetros de forma tienen una información de tipo estadística, pero pueden mostrar también características de vida útil y eficiencia productiva, que ayuden a tomar decisiones no solo para producción sino para mantenimiento.

Los modelos escogidos para los análisis realizados en esta monografía fueron: Weibull tres parámetros y dos parámetro

- ✚ B Etapa de vida útil
- ✚  $\eta$  Promedio entre fallas o tiempo operacional
- ✚  $\gamma$  Tiempo de la primera falla
- ✚  $\lambda$  tasa de fallas

## 4. MARCO CONTEXTUAL

En este capítulo describimos el proceso de extracción, almacenamiento, tratamiento y transporte de petróleo, para mostrar con claridad el proceso de producción de hidrocarburos, además se presentan los procesos y equipos que hacen parte del tratamiento de petróleo de la estación Acacias

### 4.1 UBICACIÓN

El campo petrolero de CASTILLA, administrado desde enero 31 del 2000 y operado desde julio 31 del mismo año por la Gerencia Llanos de ECOPETROL, está ubicado entre las siguientes coordenadas: (1.045.000 E, 915.000N) y (1.051.500 E, 921.000N) con una extensión superficial de 3.600 Hectáreas y con un área de yacimiento de 1.335 Hectáreas. Está localizado a 4 Km al sureste del municipio de Castilla La Nueva en el departamento del Meta.<sup>21</sup>

Las Estaciones de Tratamiento y Recolección de crudo están construidas con base en áreas modulares así:

- Área de recibo de crudo
- Modulo A con Tanque de Compensación, Tanques de Surgencia, Tanques de prueba, con sus diques de confinamiento de fuego.
- Modulo B con Tanques de lavado y tanques de almacenamiento con sus diques de confinamiento de fuego.
- Área de Bombas de Trasiego e inyección de químicos.
- Área de Bombas de Despacho.
- Área de administración.
- Área de Calentadores.

- Área de tratamiento de aguas residuales.

<sup>21</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

## **4.2 EXTRACCION DEL PETROLEO**

El petróleo se extrae mediante la perforación de pozos sobre trampas de crudo, si la presión del yacimiento es suficiente forzara la salida natural del hidrocarburo a través de pozos que se conectan mediante una red de oleoductos hacia su tratamiento primario. Durante la vida del yacimiento la presión descenderá y será necesario utilizar otras técnicas de extracción del crudo. Esas técnicas incluyen inyección de gas, inyección de agua, extracción mediante bombas electro sumergibles y sistemas PSP.

La medida técnica y financiera es el barril que corresponde a la capacidad de 42 galones estadounidenses.

## **4.3 CARACTERISTICAS DEL CRUDO DE ACACIAS**

El Crudo de ACACIAS tiene una gravedad de 13 °API y es almacenado con un BS&W que se mantiene entre 0.12 % y 0.16 %.

La producción de crudo en campo castilla es de 170.000 barriles/día de los cuales la estación de recolección de acacias aporta 80.000 barriles/día los restantes son aportados por Castilla 1, 2 y Chichimene. También se muestra que tipo de sistema de levantamiento se está utilizando a noviembre 2011.

El Crudo de ACACIAS es un asfalto líquido natural que contiene 83% de cemento

asfáltico y 17% de solventes de diferente volatilidad. Esta composición hace que a temperaturas inferiores a 60 °C sea altamente viscoso por lo cual es conveniente calentarlo entre 70 °C y 80 °C para su aplicación en riegos o en el mezclado con otros productos.

El punto de llama del Crudo de ACACIAS es de 61°C y el punto de combustión de 91°C. Estos valores indican que se deben tener algunas precauciones para su manejo.<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

#### **4.4 DESCRIPCION DEL PROCESO**

La Estación está configurada como dos Estaciones en una, debido a la presencia de dos trenes gemelos de tratamiento denominados Módulos A y Modulo B. La producción de fluidos de los pozos se reparte equitativamente en cargas entre ellos.

Cada módulo de producción a su vez presenta dos etapas de separación en procesos interconectados. En términos generales la primera etapa de separación ocurre en un tanque de surgencia, surge tank, y la segunda etapa ocurre en un tanque de lavado, wash tank. Cada Módulo está conformado por dos tanques de surgencia y dos de lavado. Entre estas dos etapas se realiza un calentamiento del fluido para facilitar la efectividad del tratamiento.

La producción de crudo es enviada a un área de almacenamiento común ubicada en el Módulo B y desde allí es bombeada hacia la Estación de Recolección y Tratamiento Producción EBA. Para su despacho por oleoducto.

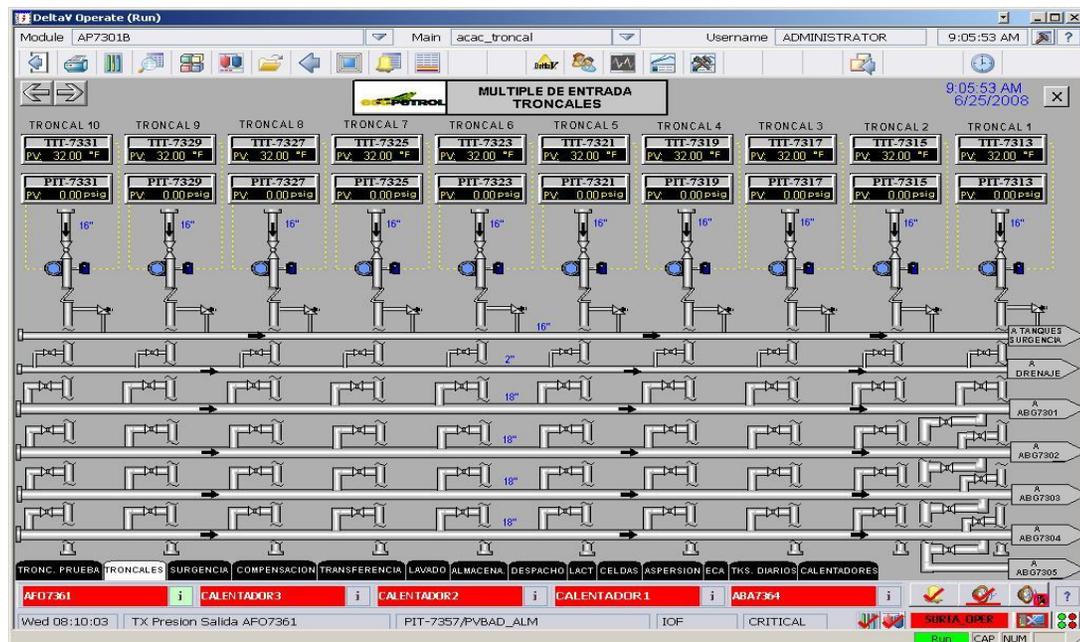
De manera similar, el agua producto de la separación es tratada en un proceso común a los dos módulos antes de su vertimiento.

#### 4.4.1 Sistema De Recolección

El Múltiple de Recolección de la Estación ACACIAS, tiene diez troncales (10 ) líneas habilitadas para recibir la producción de los pozos y cluster. Y suministrar la carga de crudo a los tanques de surgencia.<sup>23</sup> ATK7301, ATK7302 y ATK7303. Figura 13.

<sup>23</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

**Figura 13. Pantalla de Operación “Múltiple de entrada troncales”**



**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “múltiple de entrada de troncales”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008

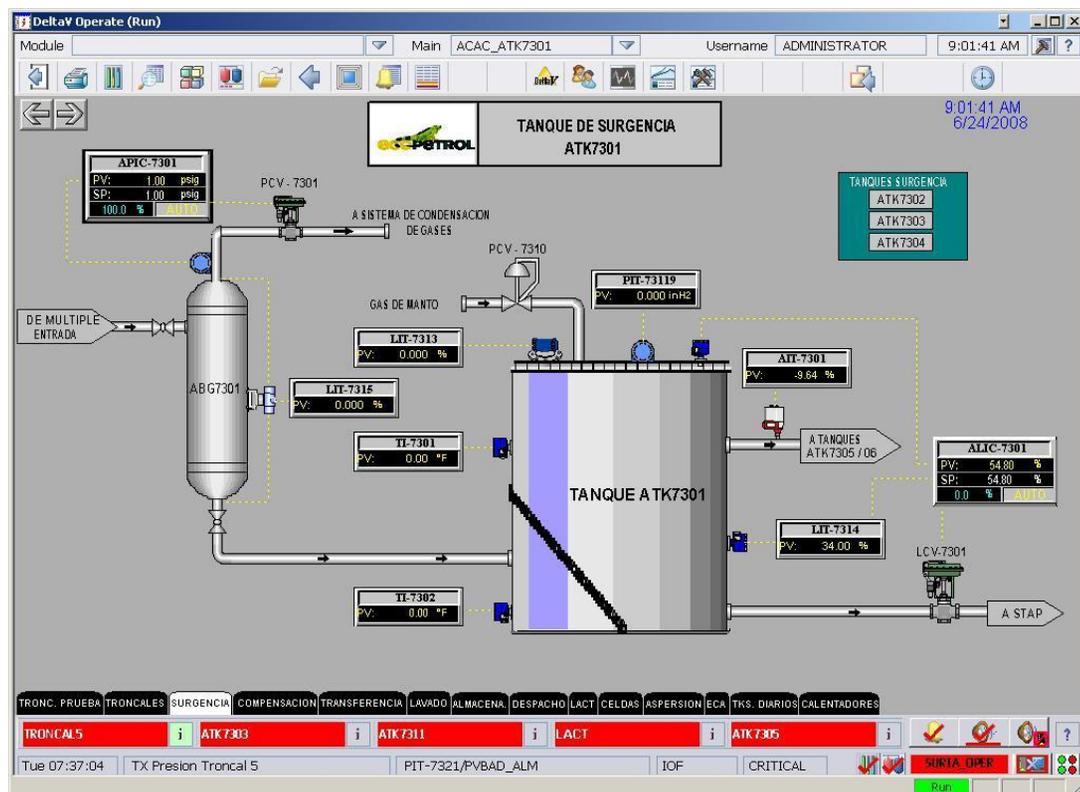
Los Cabezales de Pozo tienen un diámetro de 6”, y en la entrada al Múltiple tienen un indicador de presión con rango de 0-200 psi, una válvula de seguridad con presión de ajuste de 150 psi.

Al llegar al Múltiple de Recolección, cada línea de pozo se conecta, por medio de diferentes válvulas a los siguientes Colectores:

El colector de 10”, que recibe el fluido de producción. Desde este Colector se envía el fluido a los Tanques de Surgencia del Módulo A<sup>24</sup>. Figura 14.

<sup>24</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

**Figura 14. Pantalla de Operación “Tanque de surgencia”**



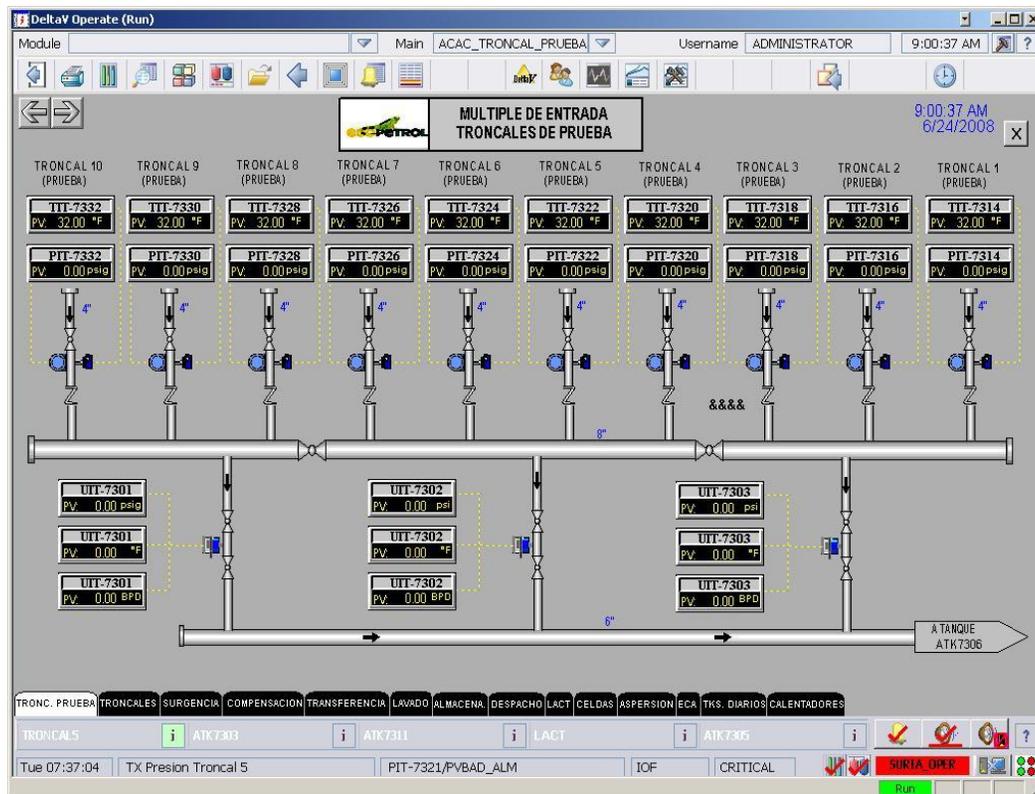
**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Tanque de surgencia”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008

## 4.5 SISTEMA DE PRUEBA

Cualquier pozo que llega al Múltiple de Recolección puede ser dirigido hacia el Colector de Prueba de las troncales con el fin de medir su tasa de producción de petróleo y de agua libre. Dicho Colector envía el fluido hacia el Tanque de Prueba, ATK-7306<sup>25</sup>. Figura 15.

<sup>25</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

**Figura 15. Pantalla de Operación “Múltiple entrada troncales de prueba”**

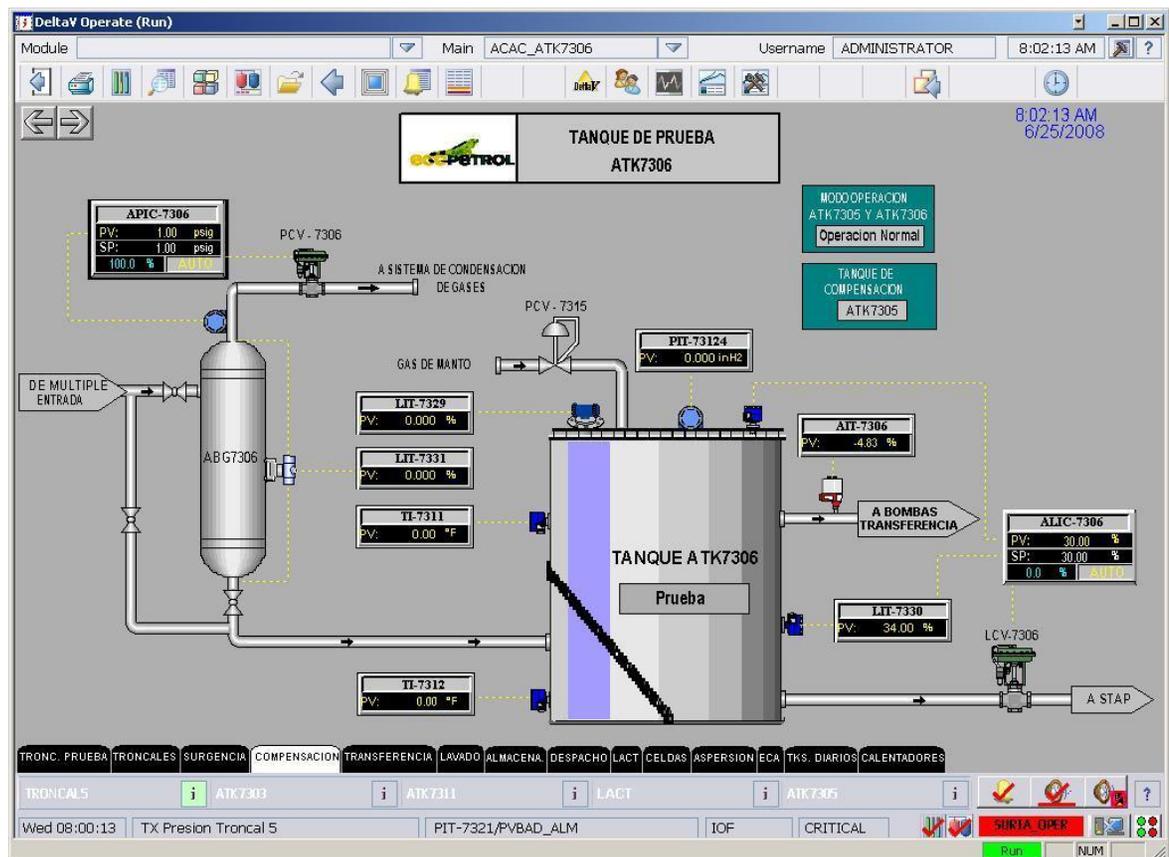


**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Múltiple entrada troncales de prueba”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008

Colector de Prueba de Pozos de 12" de diámetro, que conecta el pozo que se está probando con el Tanque de Prueba ATK7306. Adicionalmente este tanque se puede utilizar como tanque de compensación cuando el tanque ATK 7305 se utiliza como surgencia<sup>26</sup>. Figura 16.

<sup>26</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

**Figura 16. Pantalla de Operación “Tanque de prueba ATK7306”**



**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Tanque de prueba ATK7306”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008

## **4.6 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE CRUDO.**

### **4.6.1 Tratamiento de crudo.**

El proceso de tratamiento del crudo se inicia con la inyección de químicos. Se inyectan rompedor directo en el Manifold, y rompedor inverso a la entrada de los Tanques de Surgencia. Una vez el fluido de producción llega al Múltiple de Recolección puede dirigirse hacia uno de los dos Módulos de Tratamiento, Módulo A o Módulo B, según las necesidades de la operación y bajo el criterio de distribución de cargas equitativas en ambos Módulos.<sup>27</sup>

<sup>27</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

El Módulos A cuentan con los Tanques de Surgencia, ATK-7301, ATK-7302. Estos Tanques se constituyen en la primera etapa del proceso, donde el fluido tiene un tiempo de residencia y se separa una cantidad inicial de agua de la mezcla crudo/agua proveniente de los pozos.

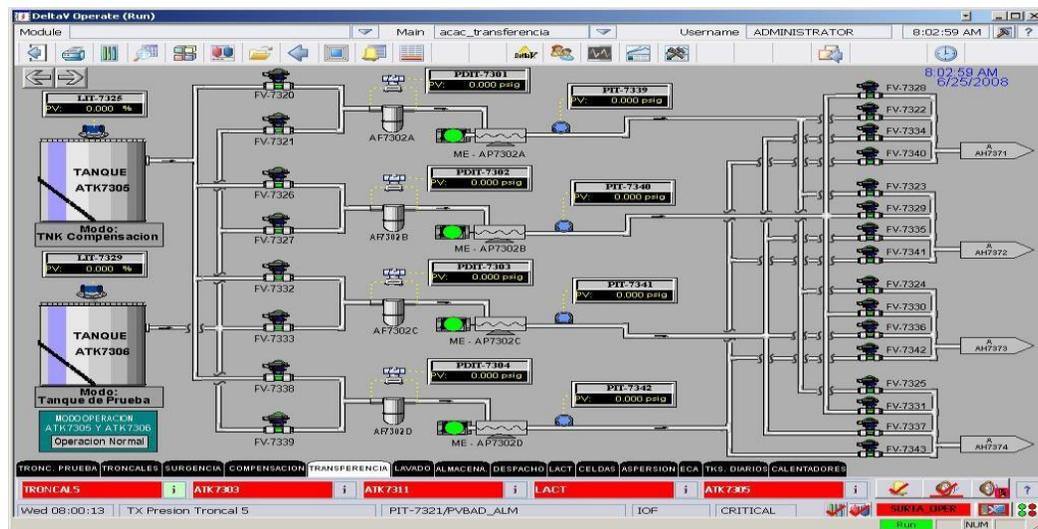
La carga es enviada al TK-7301, ATK7302 por la parte superior en una línea de 12", tras la separación la mezcla de rebose es enviada por gravedad hacia el Tanque de Compensación, ATK-7305, por una línea de 14". El agua es transferida hacia el ATK-7301 y el ATK-7302, el cual actúa de esta manera como tanque desnatador, skim tank. De este modo los Tanques actúan en serie.

Los Tanques de Surgencia del Módulo A también reciben el crudo sucio proveniente del Tanque Sumidero.

Una vez que la mezcla del rebose abandona los Tanques de Surgencia del Módulo A, como se dijo anteriormente, es recibido por el Tanque de

Compensación ATK7305. Desde este recipiente succionan las Bombas de Trasiego, AP7302A, AP7302B, AP7302C y AP7302D, las cuales se encargan de descargar la mezcla en los Calentadores. El objetivo de este Tanque es proporcionar una cabeza hidráulica positiva constante hacia las Bombas, Figura 17, con el objeto de estabilizar el proceso.

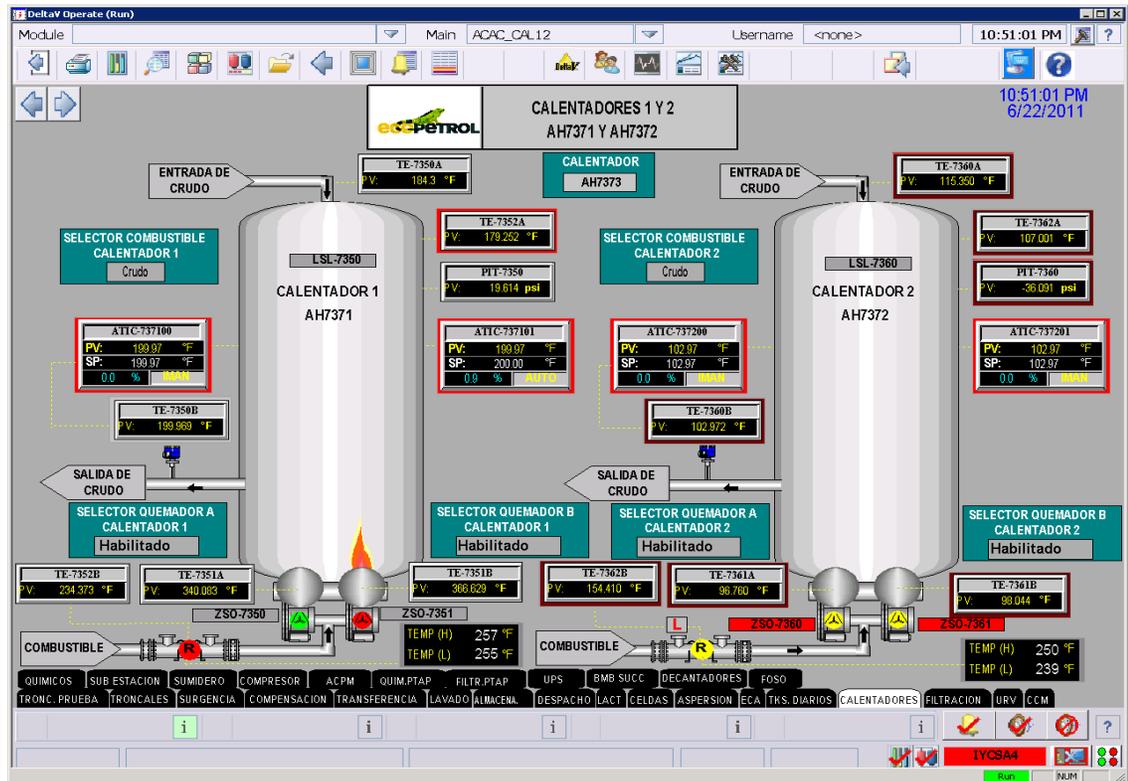
**Figura 17. Pantalla de Operación “Tanque de transferencia”**



**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Tanque de transferencia”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008.

El crudo se envía a los calentadores pirotubulares, AH7301, AH7302, AH7303 y AH7304, para aumentar su temperatura y así facilitar la separación de las fases. Estos Calentadores, Figuras 17 y 18, reciben el fluido por líneas de 10”. El crudo es calentado mediante el contacto de éste con dos “tubos de fuego” que se encuentran internamente en la vasija de cada Calentador. El crudo abandona las vasijas por líneas de 8”.

**Figura 18. Pantalla de Operación “Calentadores 1 y 2 AH7371 y AH7372”**

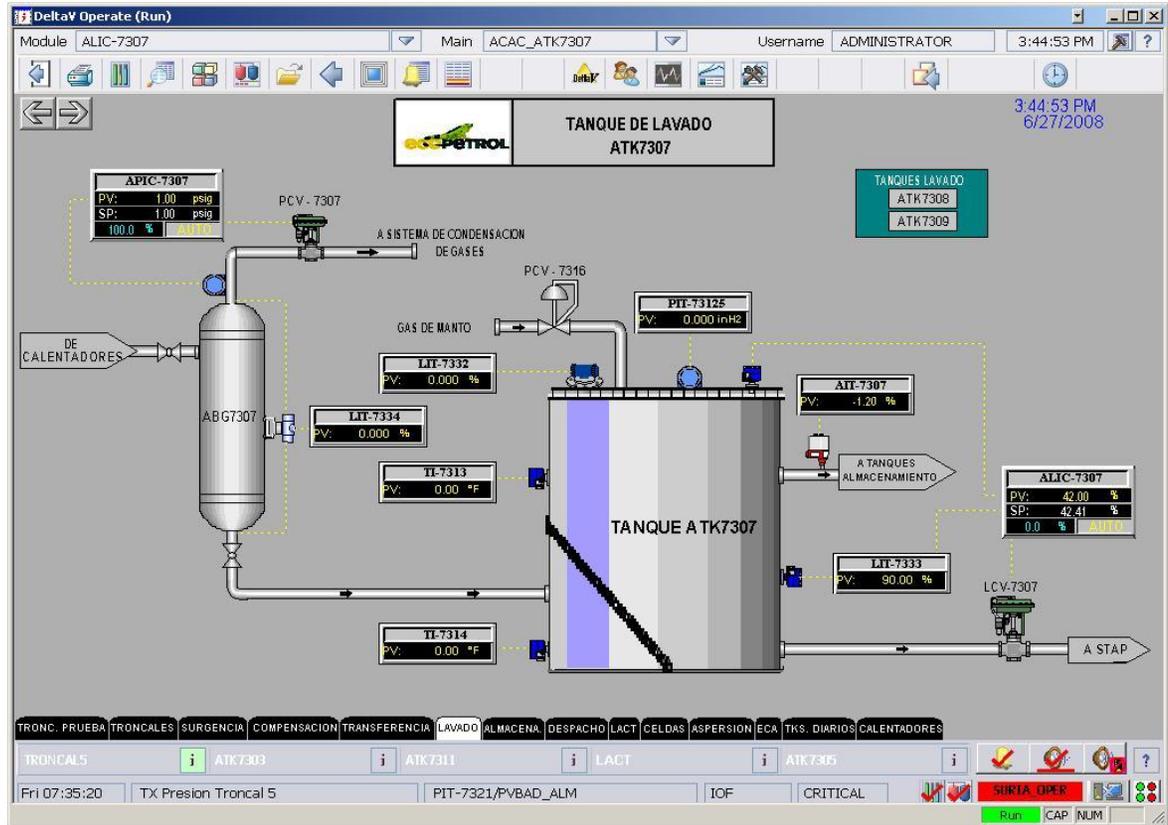


**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Calentadores 1 y 2 AH7371 y AH7372”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008.

### 3.6.2 Descripción de tanques de lavado

Los Tanques de Lavado, Wash Tank, están divididos, por medio de unos baffles, en cuatro (4) zonas en las que el fluido hace un recorrido que facilita la separación, aquí se aprovecha la diferencia de densidades como mecanismo de separación. Se mantiene siempre una temperatura de operación estable a la salida de los Calentadores para tratar de mantener invariable la capa (colchón) de agua en los Tanques de Lavado.

**Figura 19. Pantalla de Operación “Tanque de lavado ATK7307”**



**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Tanque de lavado ATK7307”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008.

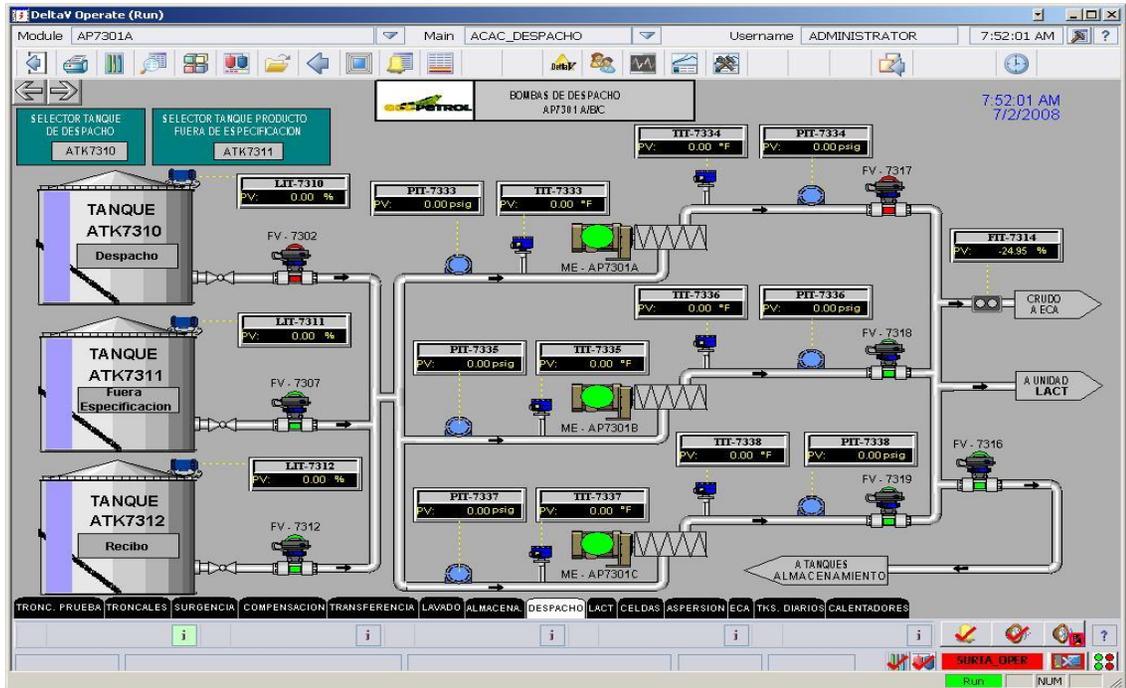
El crudo separado de los Tanques de Lavado ATK7307 y ATK7308. Se transporta hasta los Tanques de Almacenamiento ATK7310, ATK7311 y ATK7312 a través de línea de 12”. Figura 19.

#### 4.7 DESPACHO.

Después de haber realizado todo el proceso del crudo y culminar en los tanques de almacenamiento este crudo es enviado a la unidad LAC y crudo a ECA. Para realizar el envío de crudo a las diferentes áreas de trabajo se realiza con las bombas AP7301A, AP7301B, AP7301C y AP7301D<sup>28</sup>. Figura 20.

28 Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

Figura 20. Pantalla de Operación “Bomba de despacho AP7301A/B/C”



Fuente: Delta V Operate Emerson. “Bomba de despacho AP7301A/B/C”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008.

#### 4.8 TRATAMIENTO DEL AGUA

Este sistema tiene el objetivo de tratar el agua que ha sido separada durante el proceso del tratamiento de deshidratación de crudo que se carga a la Estación Acacias. Este crudo contiene un 94% de BS&W y el retiro del agua está dado de la siguiente forma:

Una parte del agua libre del Crudo de Castilla, aproximadamente 92.000 BWPd, es separada en los Tanques de Surgencia del Módulo A; otra parte es separada posteriormente en el Tanque de Compensación, aproximadamente 25.000 BWPd.

El agua separada en los Tanques de Lavado del módulo B, aproximadamente 15.000 BWPd con un contenido de aceite entre 15-25 ppm, Toda esta cantidad de agua ingresa a un cabezal de 24" de diámetro, como carga al sistema de tratamiento de agua de producción, STAP.<sup>29</sup>

<sup>29</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

El STAP, está compuesto por cinco módulos de tratamiento, con una capacidad para tratar 240,000 BWPd.

### **Módulo 1.**

Costa de tres separadores de placas corrugadas: ACPI7351, ACPI7352, ACPI7353.

Servicio: separador de aceite

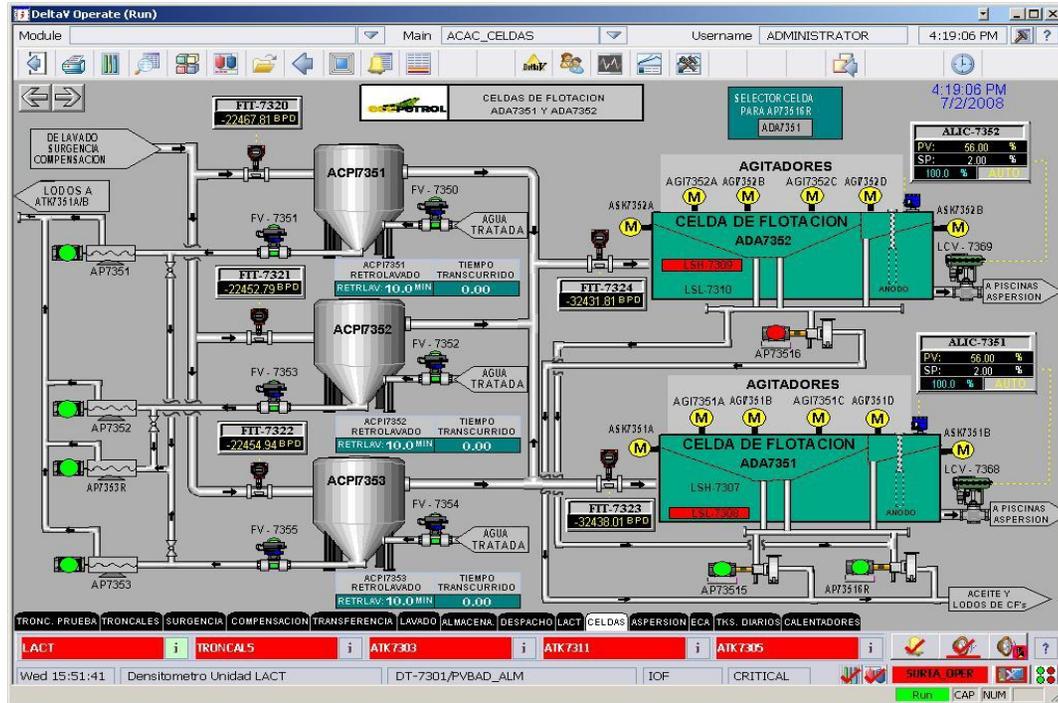
Capacidad: 80000BWPd

Temperatura operacional: 150°F a 160°F

Temperatura de diseño: 200°F

El separador de placas corrugadas permite, por la acción de la gravedad, la remoción efectiva y económica de los sólidos contenidos en aguas residuales. El diseño de la unidad de gravedad separa las partículas ligeras de los materiales pesados, en un flujo eficiente, automático y suave.

**Figura 21. Pantalla de Operación “Celdas d flotación ada7351 y ada7352”**



**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Celdas de flotación ada7351 y ada7352”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008.

Para el sistema de CPI’s; en este despliegue se puede realizar la apertura y el cierre de las válvulas que permiten el paso del agua a los CPI’s a las válvulas de salida del agua tratada y las válvulas que permiten el paso del lodo hacia los tanques 7351A y B por medio del energizado y deenergizado de las bombas para el tratamiento de los mismos.

**Módulo 2.**

Celdas de flotación	ADA- 7351 ADA- 7352. WEMCO
Servicio:	separación de aceite
Caudal:	120000 BWPD
Temperatura de operación:	150°F-160°F
Temperatura de diseño:	200°F

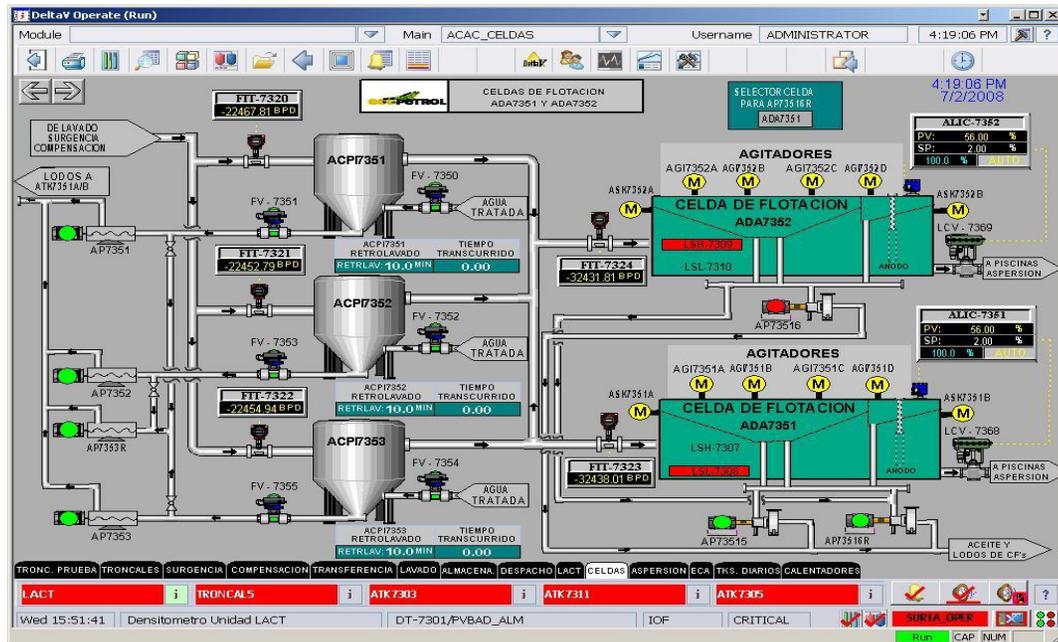
La principal función de la celda de flotación es hacer que las partículas que se han convertido en hidrofóbicas entren en contacto y se adhieran a las burbujas de aire, permitiendo así que dichas partículas se eleven a la superficie y formen una espuma, la cual es removida.<sup>31</sup> Para lograr el efectivo funcionamiento de una máquina de flotación se debe:

- Mantener las partículas en suspensión.
- Asegurar que todas las partículas que entren en la máquina, tenga la oportunidad de ser flotadas.
- Dispersar burbujas finas de aire en el seno de la pulpa.
- Promover el contacto partículas burbuja.
- Minimizar el arrastre de pulpa hacia la espuma.
- Promocionar suficiente espesor de espuma.

<sup>31</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

Para el sistema de las celdas de Flotación se puede realizar la apertura y el cierre de la las válvulas que el permiten el paso del agua proveniente de los CPI's, las válvulas de control de nivel de salida del agua tratada de la celda de flotación permiten el encendido y apagado de los motores de cada uno de los agitadores y bombas para el tratamiento de lodos y aceites. Figura 22.

**Figura 22. Pantalla de Operación “Celdas d flotación ada7351 y ada7352”**



**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Celdas de flotación ada7351 y ada7352”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008.

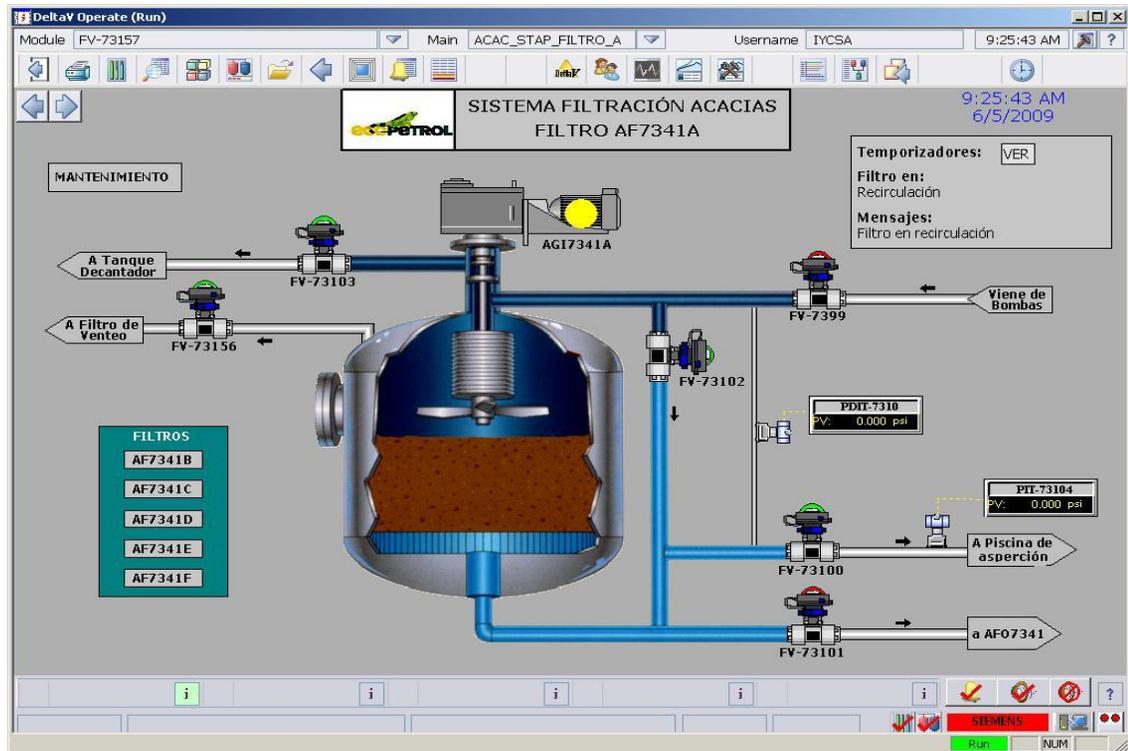
### Módulo 3.

Filtros cáscara de nuez AF- 7341 A/, B/, C/, D/.Especialmente diseñados para remover sólidos suspendidos y aceite libre de fuentes de agua de producción y aguas industriales que requieran cumplir con parámetros de vertimiento.<sup>32</sup>Figura 23 y 24.

<sup>32</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

Caudal de diseño:	50000 KBWPD
Tipo:	casquilla de nuez
Diferencial de presión limpio:	4 psi
Diferencial de presión sucio:	15 psi
Temperatura de operación:	180

**Figura 23. Pantalla de Operación “Sistema filtración acacias filtro AF341A”**



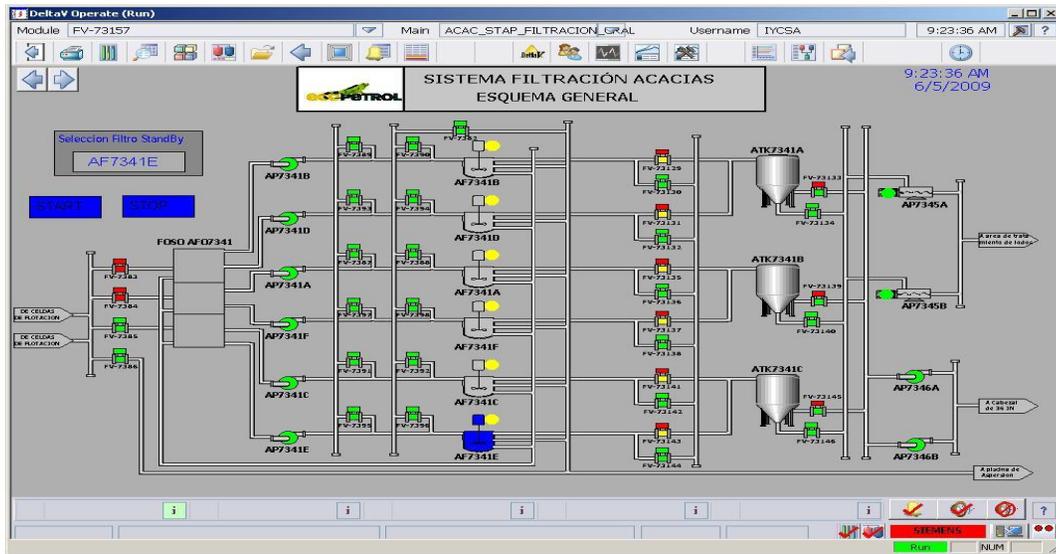
**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Sistema filtración acacias filtro AF341A”.  
Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008.

Foso: AF- 7341<sup>33</sup>

Volumen	21000 galones
Altura	2.5 metros
Ancho	4.5 metros

<sup>33</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

**Figura 24. Pantalla de Operación “Sistema filtración acacias filtro AF341A”**



**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Sistema filtración acacias filtro AF341A”.  
Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008.

Bombas a filtros AP- 7341 A/B/C/D/E/F.

Tipo	centrifugo
Flujo	1458 gpm
Potencia	68 hp
Temperatura	180°F
Presión de descarga	45 psig
NPSH disponible	24 pies
Potencia al freno	70.5 hp

Tanques de decantadores ATK 7341 A/B/C<sup>34</sup>

Tipo	vertical
Capacidad	1600 barriles
Diámetro	6 metros
Altura	12 metros

Presión	atmosférica
Temperatura	180°F.

<sup>34</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

#### Bombas de recirculación de agua AP7346A/B

Tipo	centrifuga	
Capacidad	730 gpm	
Presión de descarga	20 psig	
Temperatura de operación	180°F	
NPSHD	21 pies Potencia al freno	23.91 hp.

Se puede ver el esquema general de filtración, en el cual se pueden operar las válvulas de entrada al foso AFO 7341, las bombas succión del foso AP 7341 A/B/C/D/E/F, la apertura o cierre de las válvulas del cabezal de descarga,

Apertura o cierre de las válvulas del cabezal para entrada a los filtros y de la válvula del bypass de los filtros cáscara de nuez.

Además se puede operar el agitador de cada filtro AF 7341 A/B/C/D/E/F, se pueden operar las válvulas de entrada a los decantadores y las válvula al cabezal de distribución de los decantadores, también se pueden operar las válvulas y las bombas de la salida de los decantadores del agua al múltiple de recibo del sistema de tratamiento de agua, las válvulas para salida de lodos de los decantadores y las bombas.<sup>35</sup>

#### **Módulo 4.**

Sistema que consta de tres pozos colectores con cuatro bombas verticales por colector y su respectiva piscina de aspersión. ABA- 7361 ABA- 7362 ABA- 7363.

<sup>35</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

Este sistema consta de cuatro bombas verticales tipo sumidero instaladas en paralelo, que succionan agua de un pozo colector que se encuentra a una temperatura de 67.2°C y es descargado a un sistema de aspersores donde se realiza el proceso de aireación de agua quedando a una temperatura de 27,5 °C. De allí es transportada a las piscinas de vertimiento, para su posterior despacho al río GUATIQUEIA.

Dimensiones piscina de aspersión ABA- 7361 ABA- 7362.

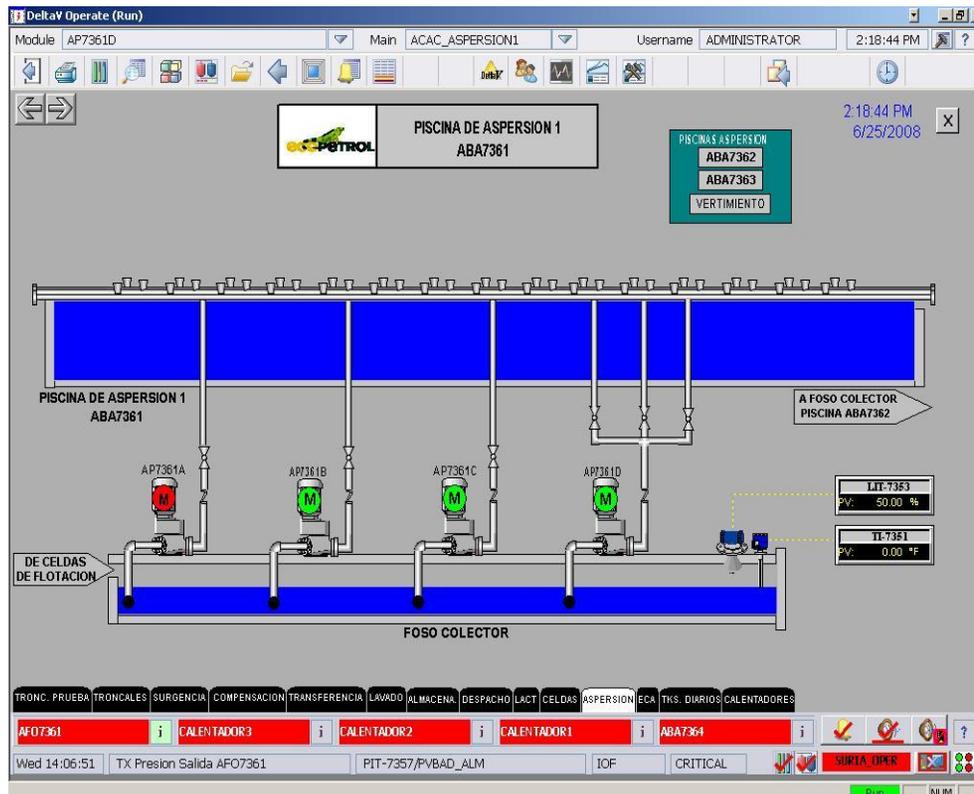
Longitud:	60m
Ancho:	22m
Profundidad:	1.5 m
Capacidad:	12.434 barriles
Temperatura de operación:	33,33-37,7°C

Piscina de aspersión 1 ABA- 7361.

En el despliegue que se muestra en la figura 25 se puede operar los motores de las bombas verticales AP7361 A/B/C/D, que envían agua del foso para realizar aireación y así lograr que la temperatura del agua descienda, también se puede visualizar el nivel de la piscina de aspersión por medio del LIT 7353 y TI 7351.<sup>36</sup>

<sup>36</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

**Figura 25. Pantalla de Operación “Piscina de aspersión aba 7361”**



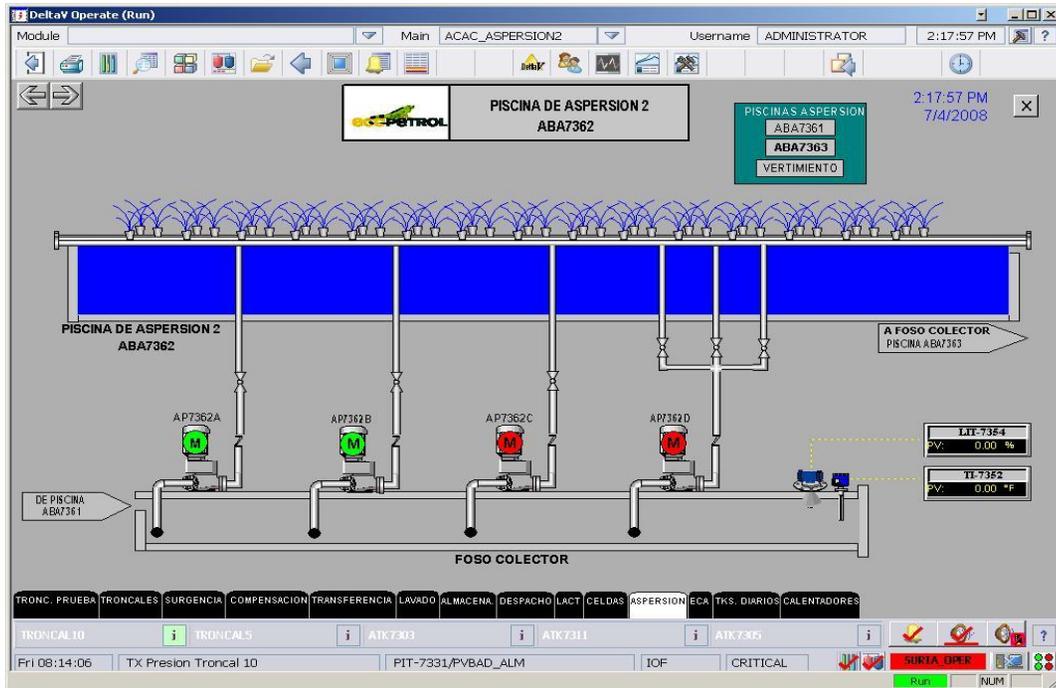
**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Piscina de aspersión aba7361”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008.

Piscina de aspersión 2 ABA- 7362.

En el despliegue que se muestra en la figura 26 se puede operar los motores de las bombas verticales AP7362 A/B/C/D, que envían agua del foso para su realizar aireación y así lograr que la temperatura del agua descienda, también se puede visualizar el nivel de la piscina de aspersión por medio del LIT 7354 y TI 7352.<sup>37</sup>

<sup>37</sup> Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

**Figura 26. Pantalla de Operación “Piscina de aspersion ABA7362”**



**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Piscina de aspersion ABA7362”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008.

Dimensiones piscina de aspersion ABA- 7363

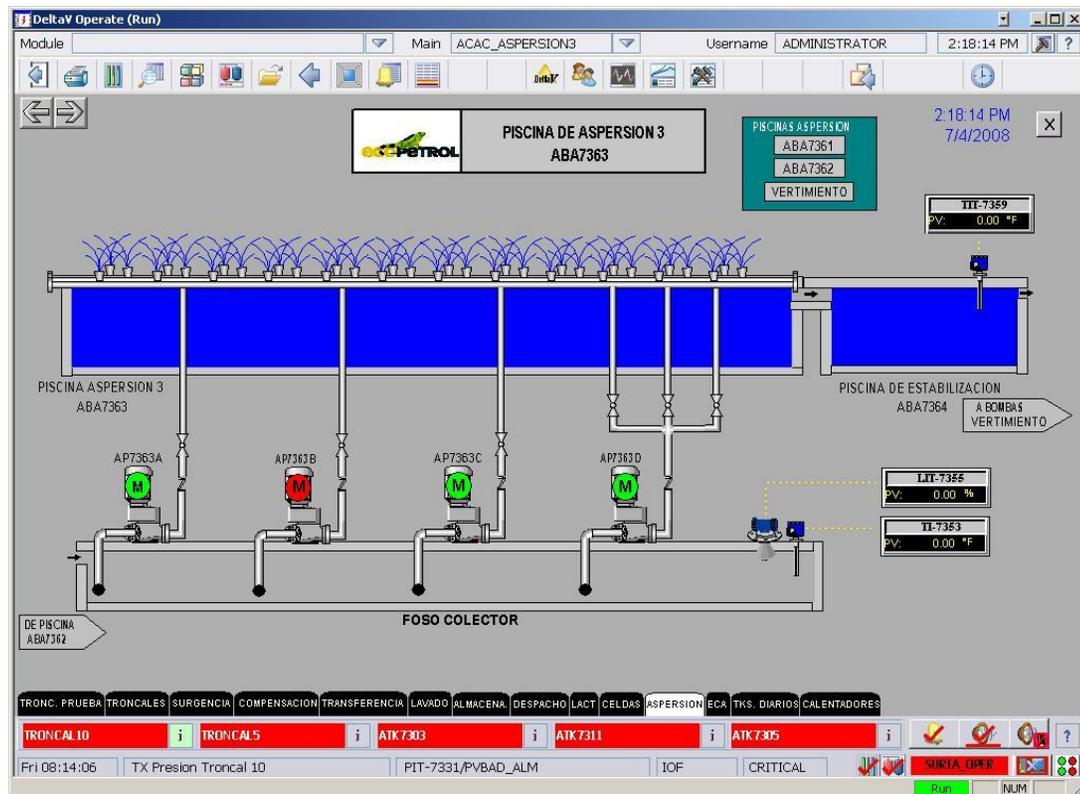
Longitud	110m
Ancho	45.6m
Profundidad	1.2 m
Capacidad	35000 barriles

Piscina de estabilización 3 ABA 7364 A/B.

En el despliegue que se observa en la figura 27 se puede operar los motores de las bombas verticales AP7363 A/B/C/D, que envían agua del foso para su aireación y así lograr que la temperatura del agua descienda, también se puede visualizar el nivel de la piscina de aspersion por medio del LIT 7355 y TI 7353, adicionalmente se puede comprobar la temperatura que tiene el agua en la piscina de estabilización por medio del TIT 7359.<sup>38</sup>

<sup>38</sup>Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

**Figura 27. Pantalla de Operación “Piscina de aspersion ABA7362”**



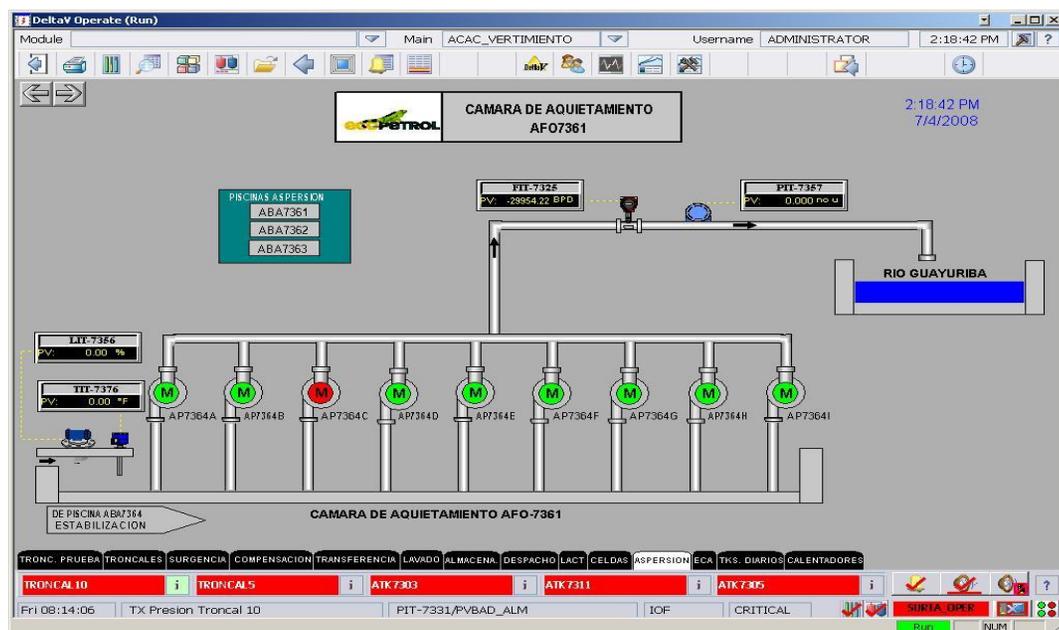
**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Celdas de flotación ada7351 y ada7352”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008.

## Vertimiento.

En el despliegue que se observa en la figura 28 se puede visualizar la temperatura del agua en la cámara de quietamiento por medio del TIT 7376 y el nivel por medio del LIT 7356.<sup>39</sup>

<sup>39</sup>Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

**Figura 28. Pantalla de Operación “Piscina de aspersion ABA7362”**



**Fuente:** Delta V Operate Emerson. “Celdas de flotación ada7351 y ada7352”. Sistema Operaciones Estaciones Ecopetrol – Colombia 2008.

Se puede realizar la selección de cualquier bomba vertical AP7364 A/B/C/D/E/F/G/H/I para encender o apagar los motores, con el fin de enviar agua de la cámara de quietamiento al río Guayuriba.<sup>40</sup>

De la línea de descarga se puede conocer la cantidad de Flujo por medio del FIT 7325 y la presión por medio del PIT 7357.

Foso de vertimiento	AFO 7361
Alto	4.6 metros
Ancho	5.05 metros
Profundidad	5.75 metros
Capacidad	839 barriles
Temperatura de operación	33°C

<sup>40</sup>Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

Bombas de vertimiento AP 7364 A/B/C/D/E/F/G/H.

Tipo	vertical
Capacidad	3850 gpm
Cabezal diferencial	120 feet
Temperatura de operación	33°C
Temperatura de diseño	61.121°C
Potencia hidráulica	117 hp
NPSHA	18.6 FEET
Diferencial de presión	52.2 psig
Parada	66 psig

#### **4.9 DATOS DE LOS EQUIPO DEL SISTEMA DE ASPERSION.**

En el sistema de aspersión de la estación acacias costa de cuatro bombas verticales tipo sumidero con las siguientes características.

Bomba centrífuga vertical tipo sumidero marca HIDROMAC, ANSI 2171 modelo 6 x 8 -15 con capacidad para 1167 a 2567 GPM A 53.9 psi acoplada a motor eléctrico de 125 hp a 1800 rpm.

Con carcasa, adaptador y rejilla en hierro modular (hierro dúctil, impulsor en acero inoxidable CF8M, columna en acero A36, cojinetes en carbón grafitado, buje de fondo teflón grafitado.

Bomba con diámetro de succión de 8", descarga de 6", diámetros de sólidos 35 mm, tipo de sello mecánico sencillo, NSPH requerido de 7 mts número de etapas 1, construcción del filtro de succión: estándar rejillas de ½", diámetro de 315 mm, eficiencia nominal del 70% y conexión de descarga bridas RF.

Construcción del filtro de succión: estándar rejillas de ½", diámetro de 315 mm, eficiencia nominal del 70% y conexión de descarga bridas RF.<sup>41</sup>

<sup>41</sup>Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

**Fotografía 1. Bombas piscina de aspersión.**



## Agenda

### ESP2 (Metallic)

- **Performance**
- **Features & Benefits**
- **Competition**

### VGRP (Non-Metallic)

- **Non-Metallic Overview**
- **Performance**
- **Features, & Benefits**
- **Competition**

**Fuente:** Manual de bombas HIDROMAC entregado a ECOPEPETROL.

#### FABRICANTE:

HIDROMAC

MODELO: 6 x 8 -15

NUMERO DE SERIE:

080488

SERVICIO: BOMBA "A" PISCINA #1 DE  
ASPEION EA1

GPM: 2333

IMPLR DIA (mm): 360

MAX DIA (mm): 382

RPM: 1750

STD No.: A110-XTO

MATL CONSTR:

Datos del motor

FABRICANTE: WEG

SERVICIO: MOTOR EL "AP7361A"

TAP 1 EA1

FABRICANTE: WEG (MADE IN  
BRAZIL)

FASES: 3

POTENCIA: 90 (KW); 125 (HP)

17 JAN 08 1000167241

280S/M

FS SF: 1.00

FRECUENCIA: 60 (HZ)

DI/316SS

MAX DSGN PSI @ 100

°F:

LUBE: OIL

RPM: 1785

IA/IN; IP/IN; 7.8

F.P/ P.F: 0.86

REC DUTY: S1

REND (%) / NOM EFF.: 93.8

TEMP AMB: 40°C

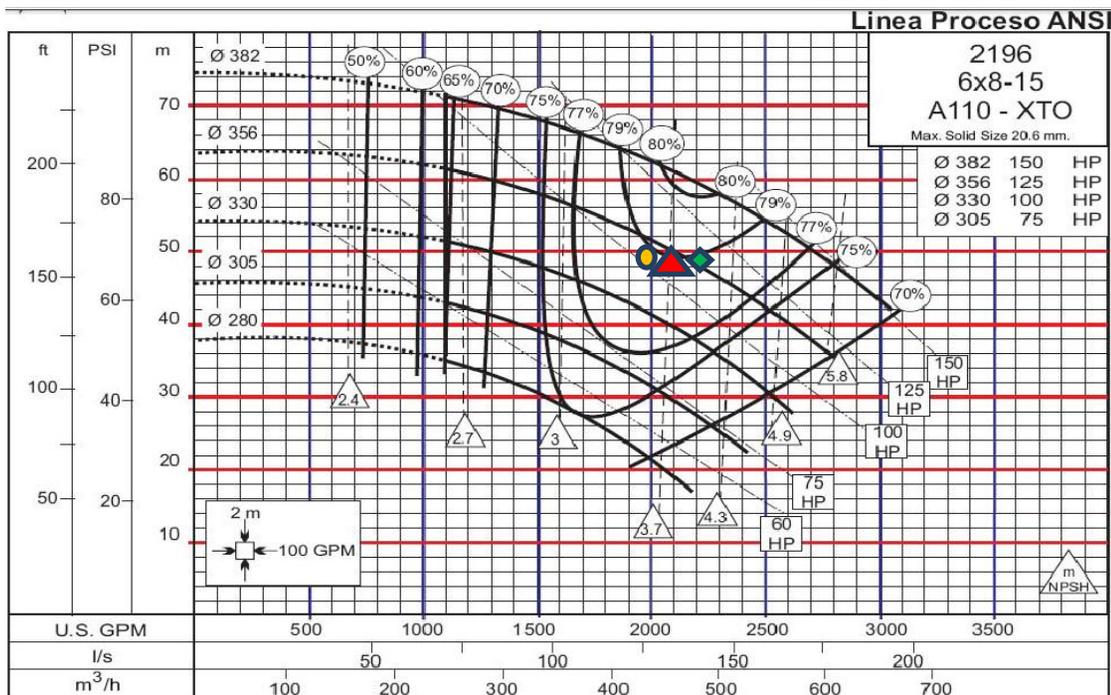
INOL INSL: F

IP55 AT 1000 MSNM

PESO: 653 (Kg)<sup>42</sup>

<sup>42</sup>Descripción detallada del sistema de proceso de la estación acacias- EA1-PG-001-ECOPETROL-2009.

**Grafica 1.curvas de operación la bomba.**



<sup>1</sup> Datos de curvas de bombas hidromac entregado a ECOPETROL0



Punto ideal de operación de la bomba.



Punto mínimo de operación de la bomba.



Punto máximo de operación de la bomba.<sup>43</sup>

<sup>43</sup>Datos de curvas de bombas hidromac entregado a ECOPETROL

## 5. ANÁLISIS DE DATOS DE VIDA

Con el fin de efectuar una proyección de datos, basado en el análisis de parámetros de forma determinando el estado inicia de confiabilidad, se requiere hacer un cálculo RAM a cada uno de los subsistemas analizados

Para tal efecto se toma la información de los modos de falla registrados y sus respectivos históricos con el fin de realizar el análisis en mención. En la tabla 6. Se observan los modos de falla más frecuentes y sus respectivas codificaciones.

**Tabla 6. Codificación de los Modos de Falla ligados al equipo.**

<b>PLU</b>	TAPONAMIENTO /RESTRINGIDO
<b>PV</b>	PREVENTIVO
<b>PDE</b>	DESVIACIÓN DE PARAMETROS
<b>NOI</b>	RUIDO
<b>LOA</b>	PERDIDA DE CARGA
<b>BRD</b>	ROTURA
<b>VIB</b>	VIBRACION
<b>FOV</b>	VOLTAJE SALIDA DEFECTUOSO
<b>OHE</b>	SOBRECALENTAMIENTO
<b>FCO</b>	FALLA AL CONECTAR
<b>LOO</b>	BAJA SALIDA
<b>INL</b>	FUGA INTERNA
<b>POW</b>	POTENCIA INSUFICIENTE

**Fuente:** Manual de aplicación y sistema erp\* “Ecopetrol”

En la tabla 7, se observan el tipo de históricos de falla vinculados a cada uno de los modos de falla. Se evidencia que debido a la naturaleza del proceso y a su gestión, los tiempos son registrados desde el momento de inicio de la operación del equipo hasta el momento en que se presenta una falla.

Esto en razón, a que, el proceso demanda que todos los equipos estén operando adecuadamente en su línea de proceso y en donde siempre se encuentre un equipo que permite hacer backup y reduzca el tiempo de intervenciones para que únicamente sea de reemplazo y arranque.

**Tabla 7. Históricos de Falla de operación del Equipo vinculados con sus Modos de Falla**

Tiempo hasta Falla (Horas)	Modo de Falla		
4	PV	984	LOA
4	PV	1032	PLU
4	OHE	1056	VIB
6	PV	1104	PV
68	LOA	1104	NOI
72	OHE	1232	LOA
96	LOA	1248	NOI
96	VIB	1296	PLU
98	PLU	1464	PLU
108	PV	1680	PDE
192	VIB	1752	PLU
216	VIB	1752	PV
264	PV	1824	PV
312	PV	1824	PV
336	VIB	1848	VIB
504	PLU	1876	INL
552	FCO	2088	PLU
576	OHE	2112	VIB
624	PLU	2208	LOA
624	LOO	2232	PV
624	INL	2278	NOI
648	PLU	2280	PV
672	PLU	2304	VIB
696	PLU	2304	PV
720	FOV	2304	PV
744	VIB	2304	PLU
864	VIB	2328	INL
936	OHE	2352	INL
		2472	PV
		2688	LOA

2904	NOI
2904	PV
3024	VIB
3072	PV
3096	BRD
3144	PV
3216	INL
3264	PV
3312	VIB
3384	PV
3456	LOA
3480	PV
3576	PLU
3624	PV
3648	PV
3672	PV

3864	FOV
3960	LOA
4056	PLU
4176	PV
4416	LOA
4872	LOA
4896	PV
4920	PV
5280	LOA
5592	PV
5640	PV
5712	PV
6864	NOI
7272	NOI
7512	POW

**Fuente:** Manual de aplicación y sistema erp\* "Ecopetrol"

## 5.1 ANÁLISIS CMD DEL EQUIPO

En este aparte, se realizarán los respectivos análisis CMD para el equipo usando todos los históricos de falla del mismo, estimando los respectivos parámetros de forma, según la distribución estadística que se ajuste.

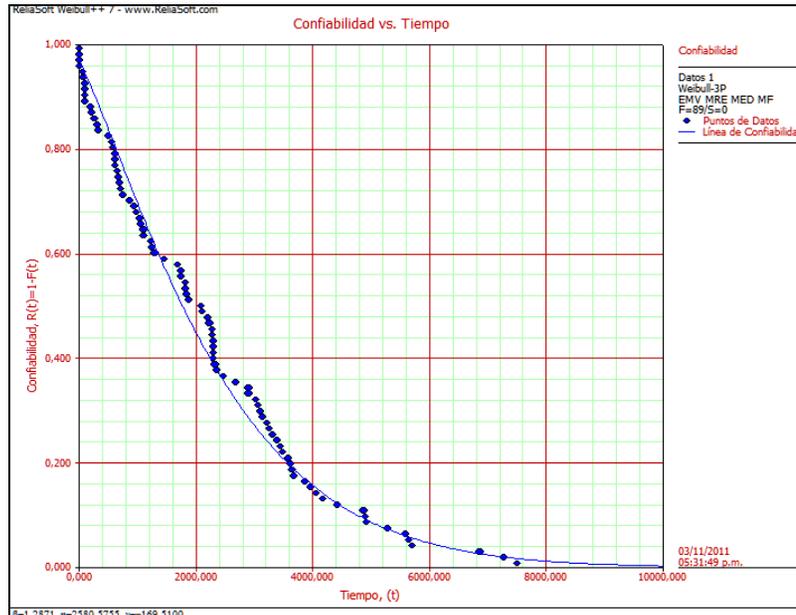
La simulación se realizará para un tiempo de 500 horas en base a los requerimientos del departamento de mantenimiento.

### Confiabilidad

Para el análisis de confiabilidad se estima, por medio del software, la distribución estadística que se ajusta a los históricos de falla del equipo. Para tal efecto, se toman todos sus datos como falla y ninguno como dato suspendido para un tiempo

de 500 horas. En la gráfica 2 se observa la relación entre la confiabilidad y el tiempo de operación del equipo en mención.

**Gráfico 2. Confiabilidad vs Tiempo**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

La distribución estadística que se ajustó a los históricos de falla el equipo, según el software, es la distribución Weibull 3 parámetros, con los siguientes datos:

**Tabla 8. Resultados Análisis Confiabilidad vs Tiempo**

Beta	1,2871
Eta	2580,5755
Gamma	-169,5100

**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++® 7. IGgroup

Se evidencia en los parámetros de forma, que el valor del Beta (según la curva de Davies o de la bañera) se encuentra entre 0,95 y 1,95. Esto indica que el equipo se encuentra en la etapa de vida útil.

El valor de Eta evidencia que el MTBF es de 2580,57 horas que indica el tiempo medio entre fallas.

Y el valor de gamma es negativo lo que evidencia que el equipo presenta fallas desde el arranque. Este parámetro indica el momento en el que se va a presentar la primera falla en la operación, y se evidencia aún mejor en la gráfica 3 que relaciona la Función de Densidad de Probabilidad del equipo.

**Gráfico 3. Función de Densidad de Probabilidad (f.d.p) del equipo**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

## 5.2 ANÁLISIS CMD (MODOS DE FALLA)

Para poder realizar un análisis adecuado y poder estimar los parámetros de forma del equipo y sus respectivos modos de falla en base a la distribución estadística que se ajuste a cada uno de ellos, es importante resaltar que, se requiere un

mínimo de registros para poder ingresarlos al software de estudio, y así, obtener una estimación correcta de los mismos.

En la tabla, se observa la ocurrencia de cada uno de los modos de falla.

**Tabla 9. Ocurrencia de Modos de Falla:**

Ocurrencia	Modo de Falla
1	BRD
1	FCO
1	LOO
1	PDE
1	POW
2	FOV

4	OHE
5	INL
6	NOI
11	LOA
12	VIB
14	PLU
29	PV

**Fuente:** Manual de aplicación y sistema erp\* “Ecopetrol”

Basado en la tabla anterior, se evidencia que los modos de falla resaltados en rojo, por ser fallas aleatorias, presentan pocos datos para poder realizar un análisis CMD sobre los modos de falla de cada uno de ellos, de forma que no permiten realizar un análisis correcto en confiabilidad.

Por tal razón, se determina que para el análisis en mención, se tomarán en cuenta los tiempos de los modos de falla resaltados en negro de la tabla anterior para realizar sus respectivos análisis CMD.

### 5.2.1 Análisis CMD para el modo de falla LOA (Pérdida de Carga)

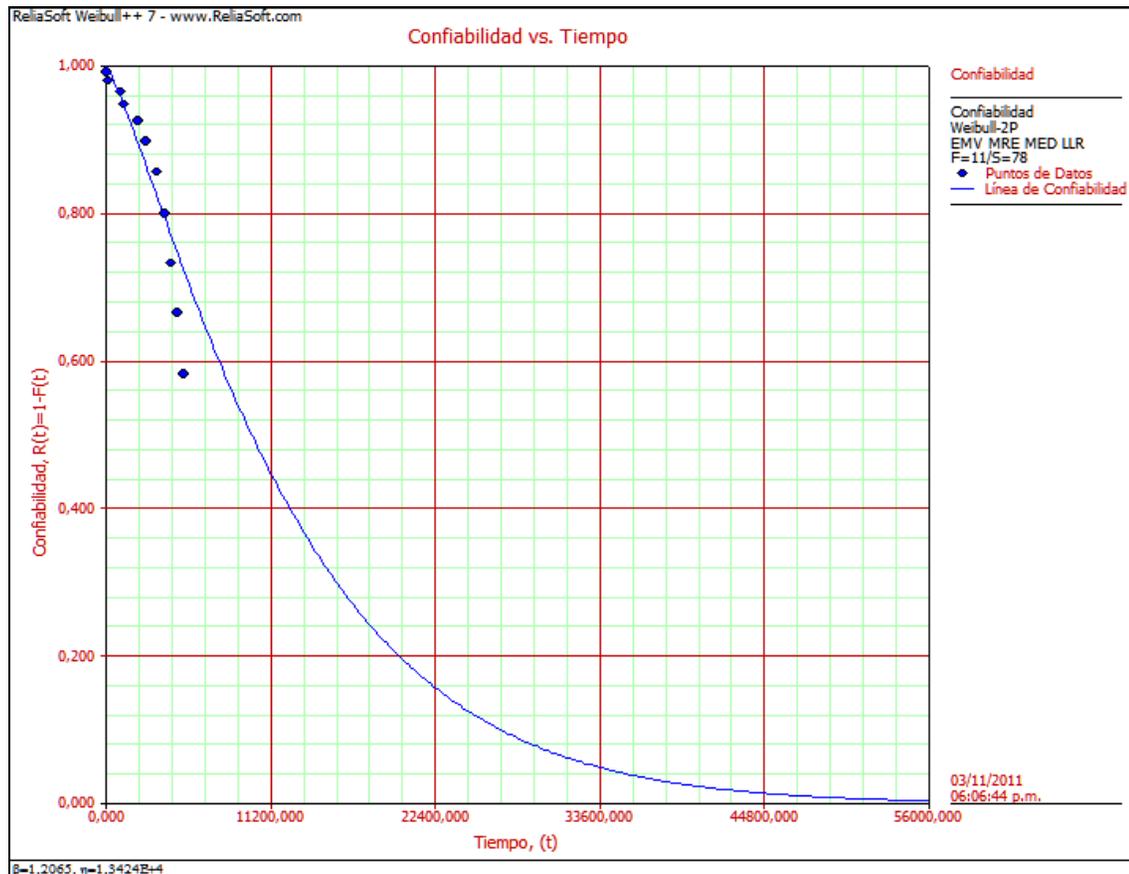
Se realizarán análisis de Confiabilidad y Disponibilidad. Para estimar la confiabilidad se tomarán los datos de los históricos de fallas generales, en donde

los modos de falla restantes (diferentes a LOA) se analizan como datos suspendidos.

## Confiabilidad

A continuación se observa la gráfica 4 de confiabilidad vs tiempo, del modo de falla LOA simulado a 500 horas. Para los históricos de este modo de falla se ajusta la distribución estadística Weibull 2 parámetros.

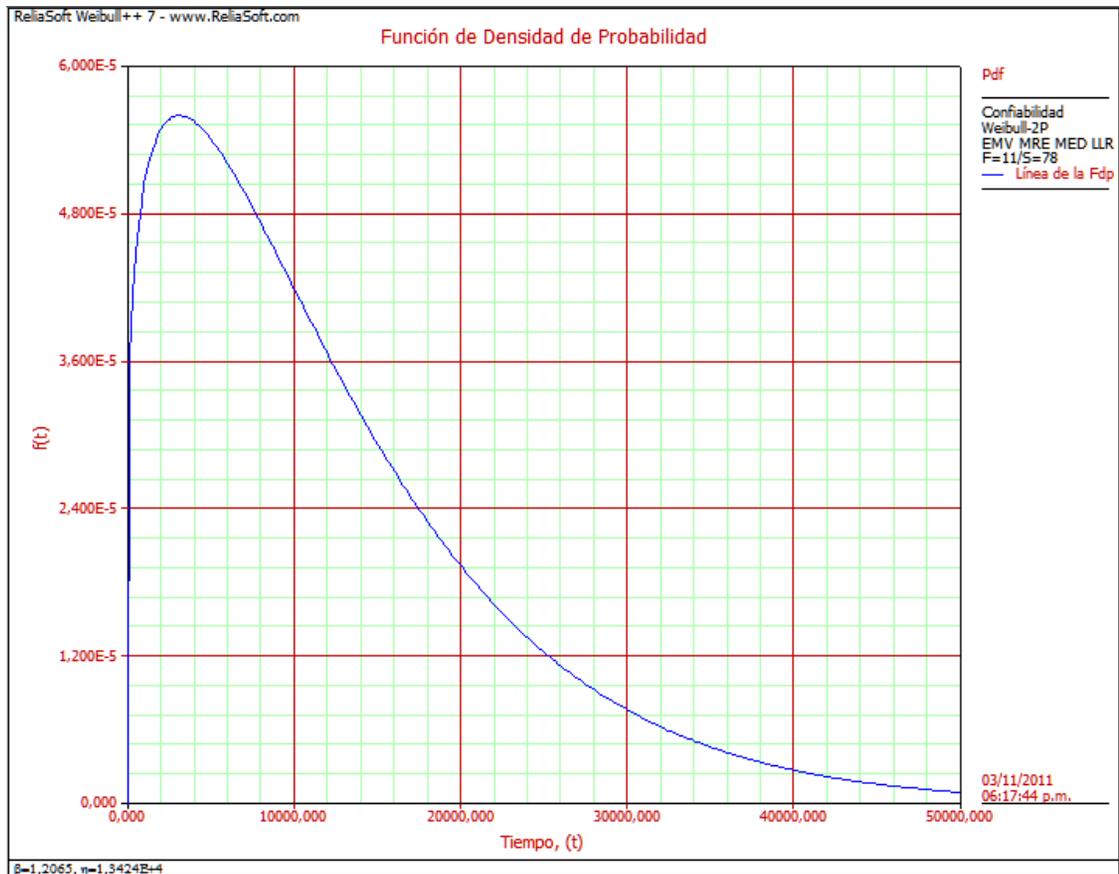
**Gráfica 4. Confiabilidad vs Tiempo para el modo de Falla LOA**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

En la gráfica 5, de función de densidad de probabilidad se evidencia que es su distribución es Weibull 2 parámetros, observando que el valor de gamma es cero.

**Gráfica 5. Función Densidad de Probabilidad para Confiabilidad Modo de Falla LOA**



**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

**Tabla 10. Resultados Densidad de Probabilidad para Confiabilidad Modo de Falla LOA**

Beta	1,2065
Eta	1,3424E+4

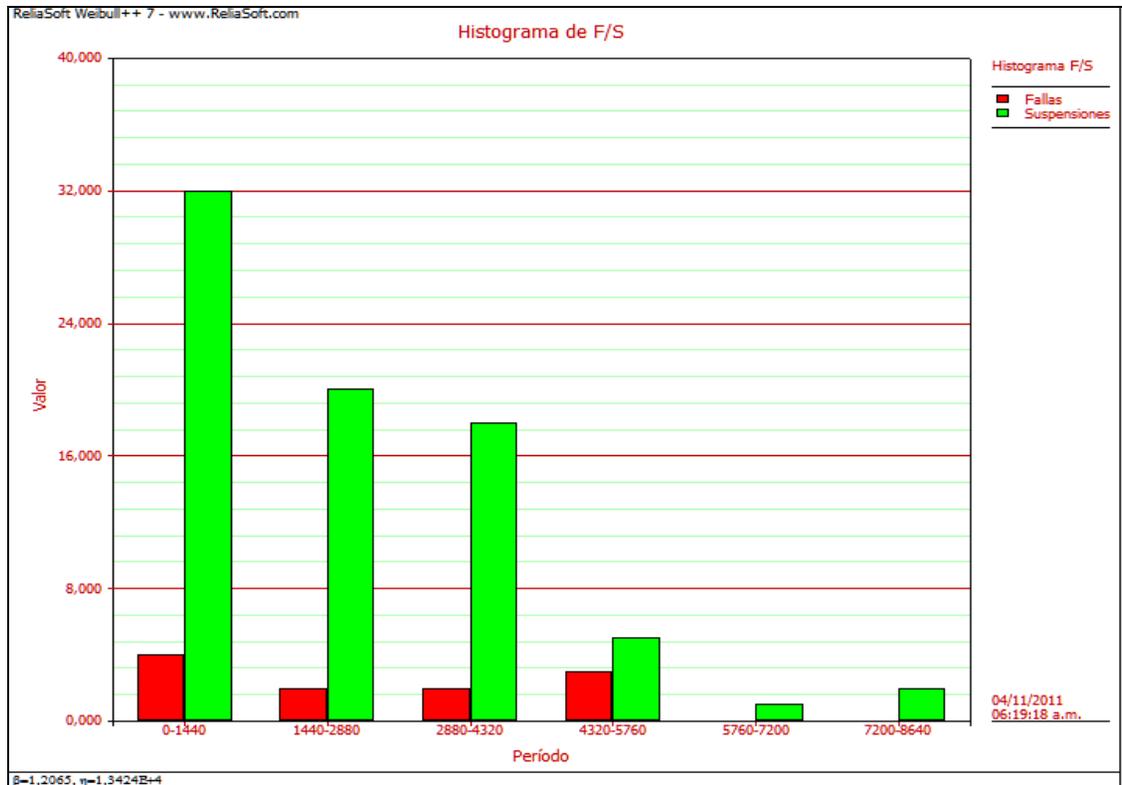
**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++® 7. IGgroup

## Parámetros de forma Weibull 2 parámetros

Se evidencia en los parámetros de forma, que el valor del Beta (según la curva de Davies o de la bañera) se encuentra entre 0,95 y 1,95. Esto indica que el equipo se encuentra en la etapa de vida útil.

El valor de Eta evidencia que el MTBF es de 13424 horas que indica el tiempo medio entre fallas.

**Gráfica 6. Histograma de fallas comparando análisis de datos suspendidos para un tiempo de 1440 horas, 2 meses.**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

En el histograma anterior, se observa la relación del modo de falla LOA con el resto a intervalos de 1440 horas (2 meses).

- En el Primer bimestre se presentarían 4 eventos LOA vs 32 datos suspendidos.
- En el 2 bimestre se presentarían 2 eventos LOA vs 20 datos suspendidos.
- En el 3 bimestre se presentarían 3 eventos LOA vs 18 datos suspendidos.
- En el 4 bimestre se presentarían 3 eventos LOA vs 5 datos suspendidos.

### Disponibilidad

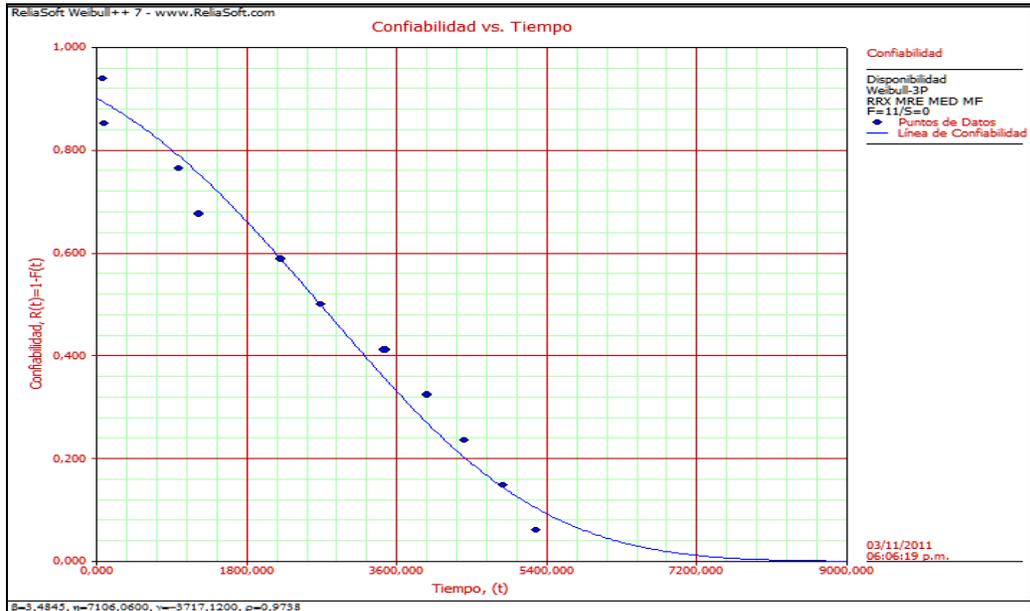
Para determinar la disponibilidad vs tiempo del modo de falla LOA, se deben usar únicamente los datos ligados al respectivo modo de falla en los históricos generales del equipo. En la tabla 11 se observan los datos usados.

**Tabla 11. Datos modo de falla LOA usados para estimar la disponibilidad.**

<b>Tiempo de Falla (hr)</b>	<b>Modo de Falla</b>
68	LOA
96	LOA
984	LOA
1232	LOA
2208	LOA
2688	LOA
3456	LOA
3960	LOA
4416	LOA
4872	LOA
5280	LOA

**Fuente:** Manual de aplicación y sistema erp\* “Ecopetrol”

**Grafica 7. Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla LOA**



**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

**Tabla 12. Resultados Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla LOA**

Beta	3,4845
Eta	7106,0600
Gamma	-3717,1200

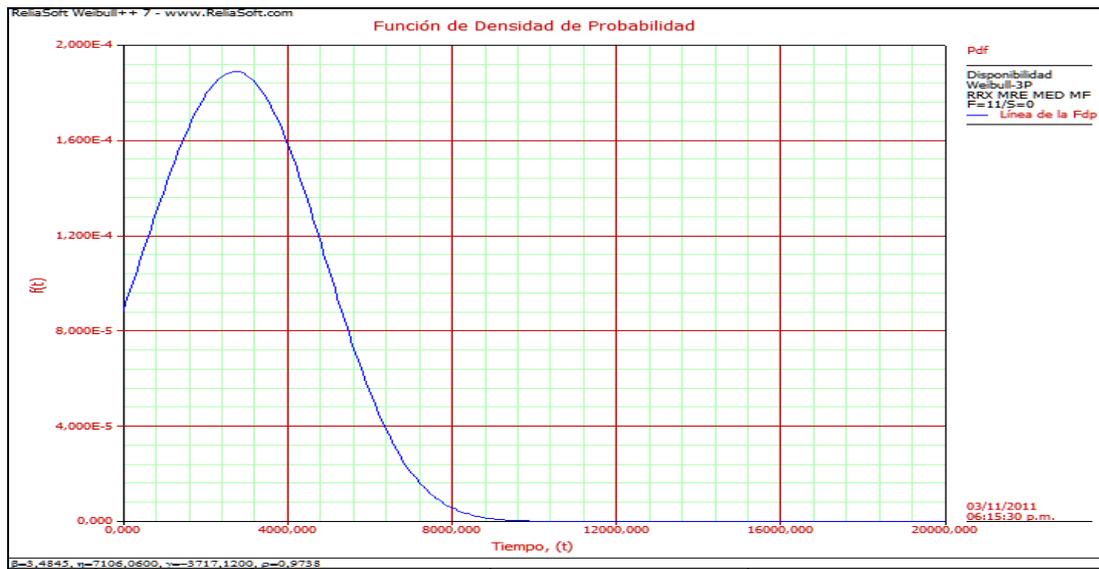
**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++® 7. IGgroup

Se evidencia en los parámetros de forma, que el valor del Beta (según la curva de Davies o de la bañera) se encuentra por encima de 3. Esto indica que este modo de falla es el más renuente a aportar paradas en el equipo, ya que se encuentra en su fase final de desgaste

El valor de Eta evidencia que el MTTF es de 2580,57 horas que indica el tiempo medio de las fallas.

Y el valor de gamma es negativo lo que evidencia que el equipo presenta fallas desde el arranque. Este parámetro indica el momento en el que se va a presentar la primera falla en la operación, y se evidencia aún mejor en la gráfica 8 que relaciona la Función de Densidad de Probabilidad del equipo.

**Gráfica 8. Curva función densidad probabilidad de la disponibilidad modo de falla LOA**



**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

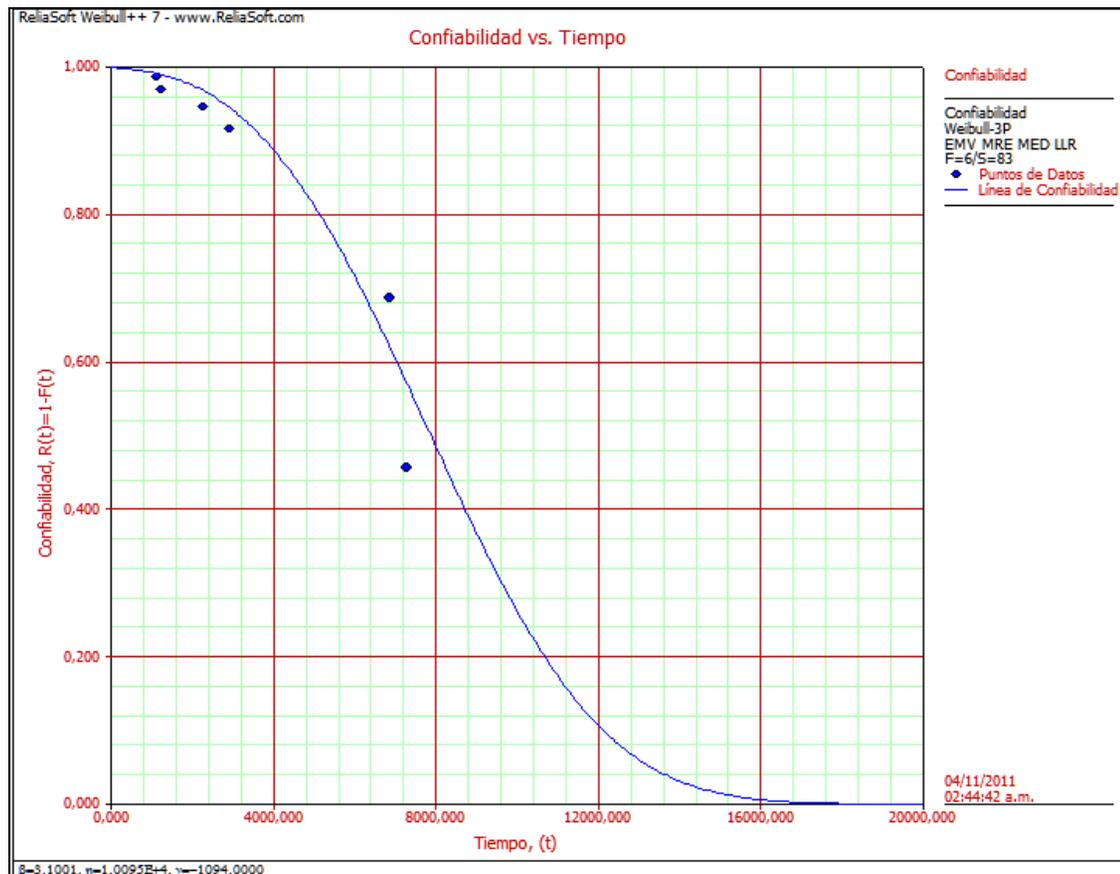
### 5.2.2. Análisis CMD para el modo de falla NOI (Ruido)

Se realizarán análisis de Confiabilidad y Disponibilidad. Para estimar la confiabilidad se tomarán los datos de los históricos de falla generales, en donde los modos de falla restantes (diferentes a NOI) se analizan como datos suspendidos.

## Confiabilidad

A continuación se observa la gráfica 9 de confiabilidad vs tiempo, del modo de falla NOI simulado a 500 horas. Para los históricos de este modo de falla se ajusta la distribución estadística Weibull 3 parámetros.

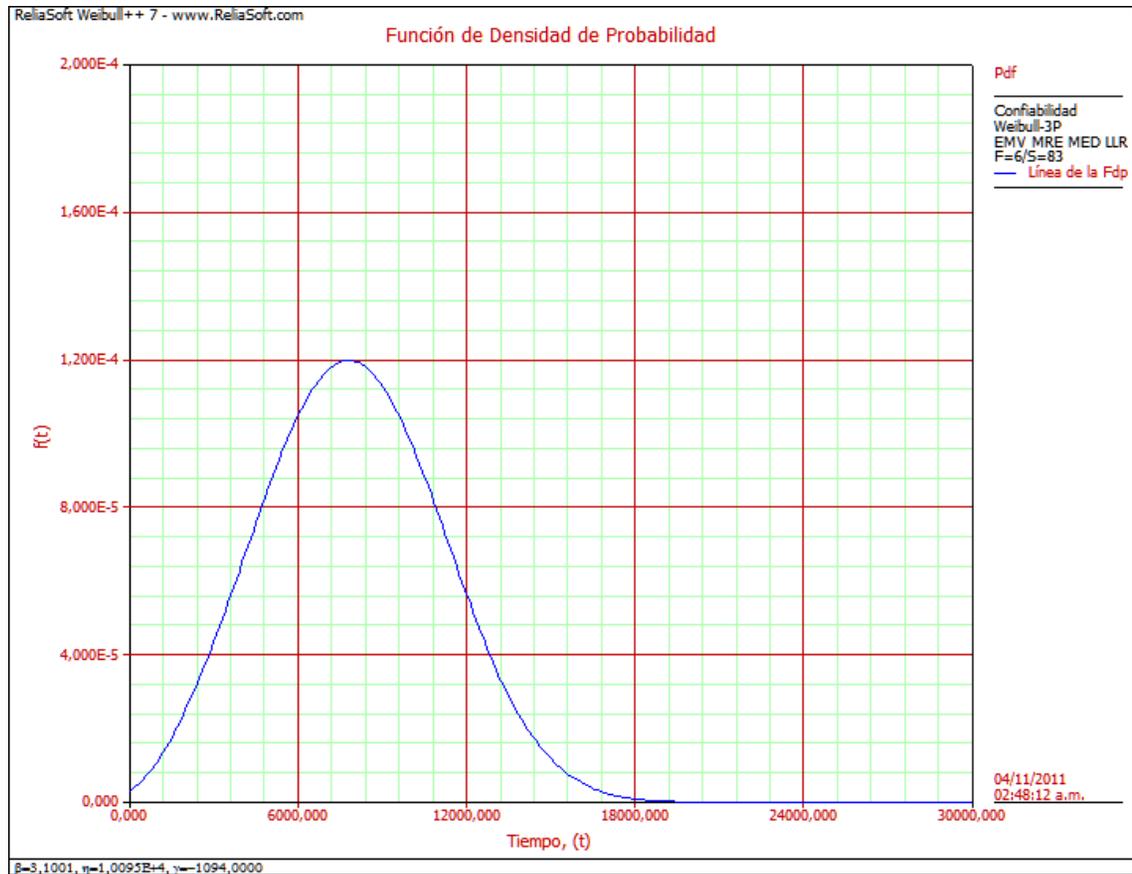
**Gráfica 9. Confiabilidad vs Tiempo para el modo de Falla NOI**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

En la gráfica 10, de función de densidad de probabilidad se evidencia que es su distribución es Weibull 3 parámetros, observando que el valor de gamma es cero.

**Gráfica 10. Función de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla NOI**



**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

**Tabla 13. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla NOI**

Beta	3,1001
Eta	1,0095E+4
Gamma	-1094,0000

**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++® 7. IGgroup

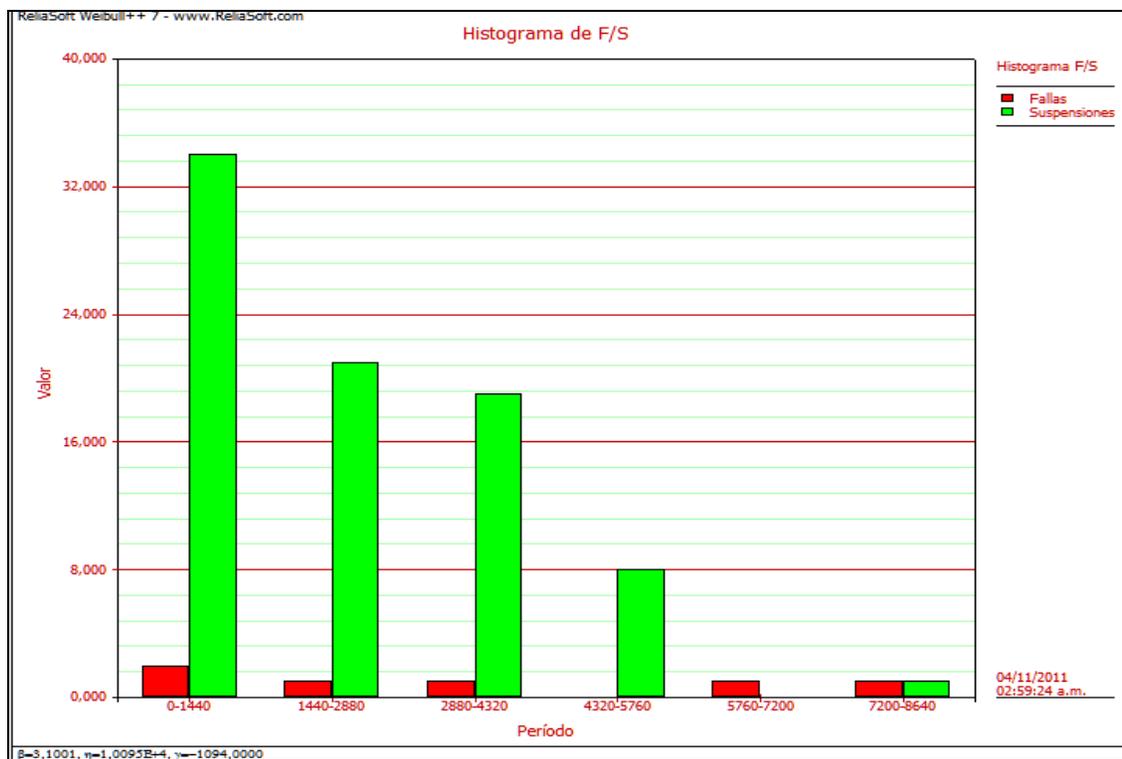
**Parámetros de forma Weibull 3 parámetros**

Se evidencia en los parámetros de forma, que el valor del Beta (según la curva de Davies o de la bañera) se encuentra por encima de 3. Razón por la cual, este modo de falla, en este momento, presenta fallas recurrentes debido al estado de vida en relación al modo, dado que se encuentra en etapa final de desgaste y puede perjudicar el comportamiento del equipo.

El valor de Eta evidencia que el MTBF es de 10095 horas que indica el tiempo medio entre fallas. Grafica 11.

Su eta indica que este modo de falla se ha presentado desde el arranque como se evidencia en la curva pdf.

**Gráfica 11. Histograma de fallas comparando análisis de datos suspendidos para un tiempo de 1440 horas, 2 meses.**



Fuente: ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

En el histograma anterior, se observa la relación del modo de falla NOI con el resto a intervalos de 1440 horas (2 meses).

- En el Primer bimestre se presentarían 2 eventos NOI vs 34 datos suspendidos.
- En el 1 bimestre se presentarían 2 eventos NOI vs 21 datos suspendidos.
- En el 3 bimestre se presentarían 1 eventos NOI vs 19 datos suspendidos.
- En el 4 bimestre se presentarían 0 eventos LOA vs 8 datos suspendidos.

### **Disponibilidad**

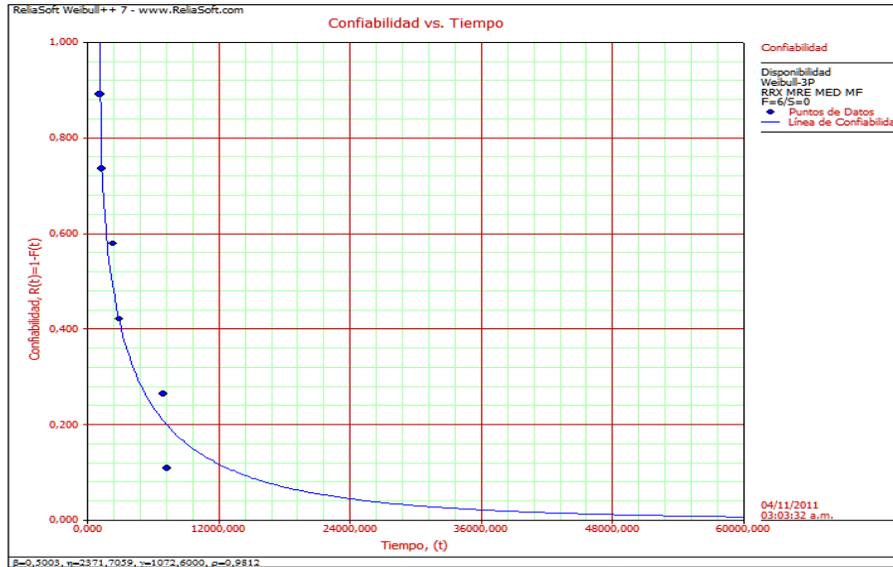
Para determinar la disponibilidad vs tiempo del modo de falla NOI, se deben usar únicamente los datos ligados al respectivo modo de falla en los históricos generales del equipo. En la tabla 14 se observan los datos usados.

**Tabla 14. Datos modo de falla NOI usados para estimar la disponibilidad**

<b>Tiempo de Falla (hr)</b>	<b>Modo de Falla</b>
1104	NOI
1248	NOI
2278	NOI
2904	NOI
6864	NOI
7272	NOI

**Fuente:** Manual de aplicación y sistema erp\* “Ecopetrol”

**Grafica 12. Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla NOI**



**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

**Tabla 15. Resultados de Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla NOI**

Beta	0,5003
Eta	2371,7059
Gamma	1072,6000

**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++® 7. IGgroup

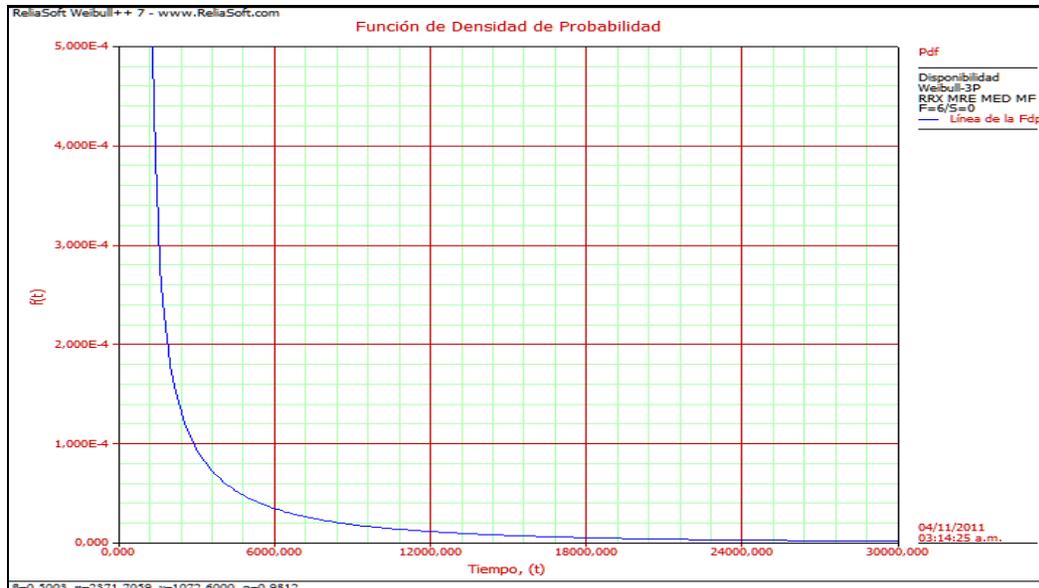
Se evidencia en los parámetros de forma, que el valor del Beta (según la curva de Davies o de la bañera) se encuentra por encima de 3. Esto indica que este modo de falla es el más renuente a aportar paradas en el equipo, ya que se encuentra en su fase final de desgaste

El valor de Eta evidencia que el MTTF es de 2371,70 horas que indica el tiempo medio para fallar.

Y el valor de gamma es de 1072,6 horas lo que evidencia arranca con cierta disponibilidad. Este parámetro indica el momento en el que se va a presentar la

primera falla en la operación, y se evidencia aún mejor en la gráfica 13 que relaciona la Función de Densidad de Probabilidad del equipo.

### Gráfica 13. Curva función densidad de probabilidad de la disponibilidad del modo de falla NOI



Fuente: ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

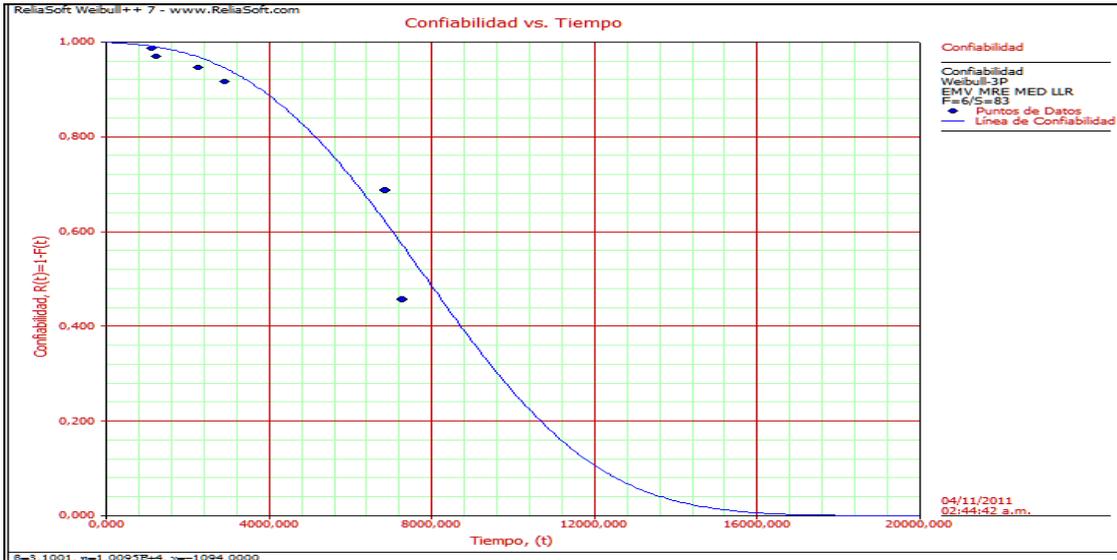
### Análisis CMD para el modo de falla NOI (Ruido)

Se realizaron análisis de Confiabilidad y Disponibilidad. Para estimar la confiabilidad se tomaron los datos de los históricos de falla generales, en donde los modos de falla restantes (diferentes a NOI) se analizan como datos suspendidos.

### Confiabilidad

A continuación se observa la gráfica 14 de confiabilidad vs tiempo, del modo de falla NOI simulado a 500 horas. Para los históricos de este modo de falla se ajusta la distribución estadística Weibull 3 parámetros.

**Gráfica 14.de Confiabilidad vs Tiempo para el modo de Falla NOI**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

En la gráfica 15 de función de densidad de probabilidad se evidencia que es su distribución es Weibull 3 parámetros, observando que el valor de gamma es cero.

**Gráfica 15. Función de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla NOI**



**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

**Tabla 16. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla NOI**

Beta	3,1001
Eta	1,0095E+4
Gamma	-1094,0000

**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++® 7. IGgroup

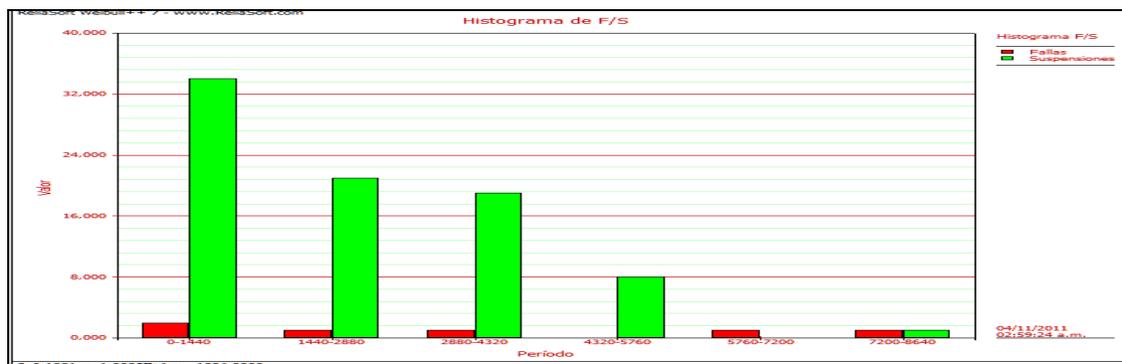
### Parámetros de forma Weibull 3 parámetros

Se evidencia en los parámetros de forma, que el valor del Beta (según la curva de Davies o de la bañera) se encuentra por encima de 3. Razón por la cual, este modo de falla, en este momento, presenta fallas recurrentes debido al estado de vida en relación al modo, dado que se encuentra en etapa final de desgaste y puede perjudicar el comportamiento del equipo. Grafica 16.

El valor de Eta evidencia que el MTBF es de 10095 horas que indica el tiempo medio entre fallas.

Su Eta indica que este modo de falla se ha presentado desde el arranque como se evidencia en la curva pdf.

**Gráfica 16. Histograma de fallas comparando análisis de datos suspendidos para un tiempo de 1440 horas, 2 meses.**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

En el histograma anterior, se observa la relación del modo de falla NOI con el resto a intervalos de 1440 horas (2 meses).

- En el Primer bimestre se presentarían 2 eventos NOI vs 34 datos suspendidos.
- En el 1 bimestre se presentarían 2 eventos NOI vs 21 datos suspendidos.
- En el 3 bimestre se presentarían 1 eventos NOI vs 19 datos suspendidos.
- En el 4 bimestre se presentarían 0 eventos LOA vs 8 datos suspendidos.

### **Disponibilidad**

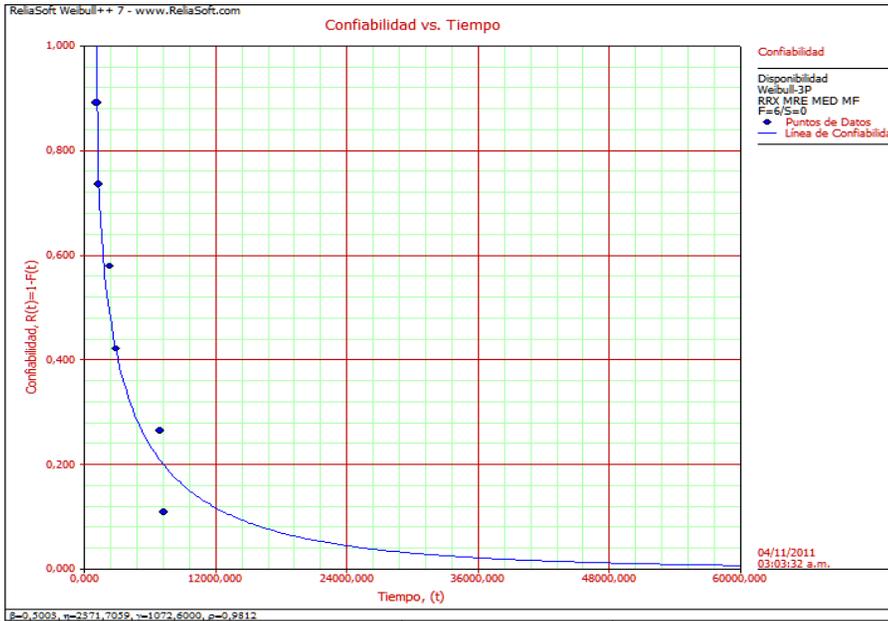
Para determinar la disponibilidad vs tiempo del modo de falla NOI, se deben usar únicamente los datos ligados al respectivo modo de falla en los históricos generales del equipo. En la tabla 17 se observan los datos usados en la grafica 17.

**Tabla 17. Datos modo de falla NOI usados para estimar la disponibilidad**

<b>Tiempo de Falla (hr)</b>	<b>Modo de Falla</b>
1104	NOI
1248	NOI
2278	NOI
2904	NOI
6864	NOI
7272	NOI

**Fuente:** Manual de aplicación y sistema erp\* "Ecopetrol"

### Grafica 17. Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla NOI



Fuente: Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

Tabla 18. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla NOI

Beta	0,5003
Eta	2371,7059
Gamma	1072,6000

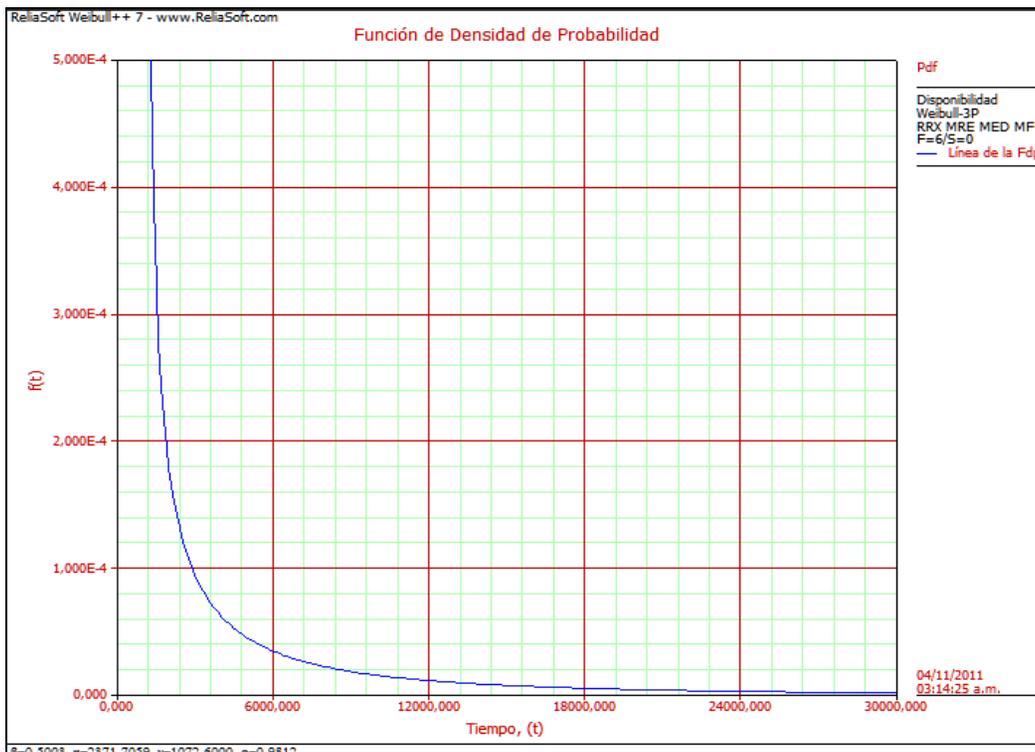
Fuente: Reliasoft Corporation. Weibull++® 7. IGgroup

Se evidencia en los parámetros de forma, que el valor del Beta (según la curva de Davies o de la bañera) se encuentra por encima de 3. Esto indica que este modo de falla es el más renuente a aportar paradas en el equipo, ya que se encuentra en su fase final de desgaste

El valor de Eta evidencia que el MTTF es de 2371,70 horas que indica el tiempo medio para fallar.

Y el valor de gamma es de 1072,6 horas lo que evidencia arranca con cierta disponibilidad. Este parámetro indica el momento en el que se va a presentar la primera falla en la operación, y se evidencia aún mejor en la gráfica 18 que relaciona la Función de Densidad de Probabilidad del equipo.

**Gráfica 18. Curva función densidad de probabilidad de la disponibilidad del modo de falla NOI**



**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

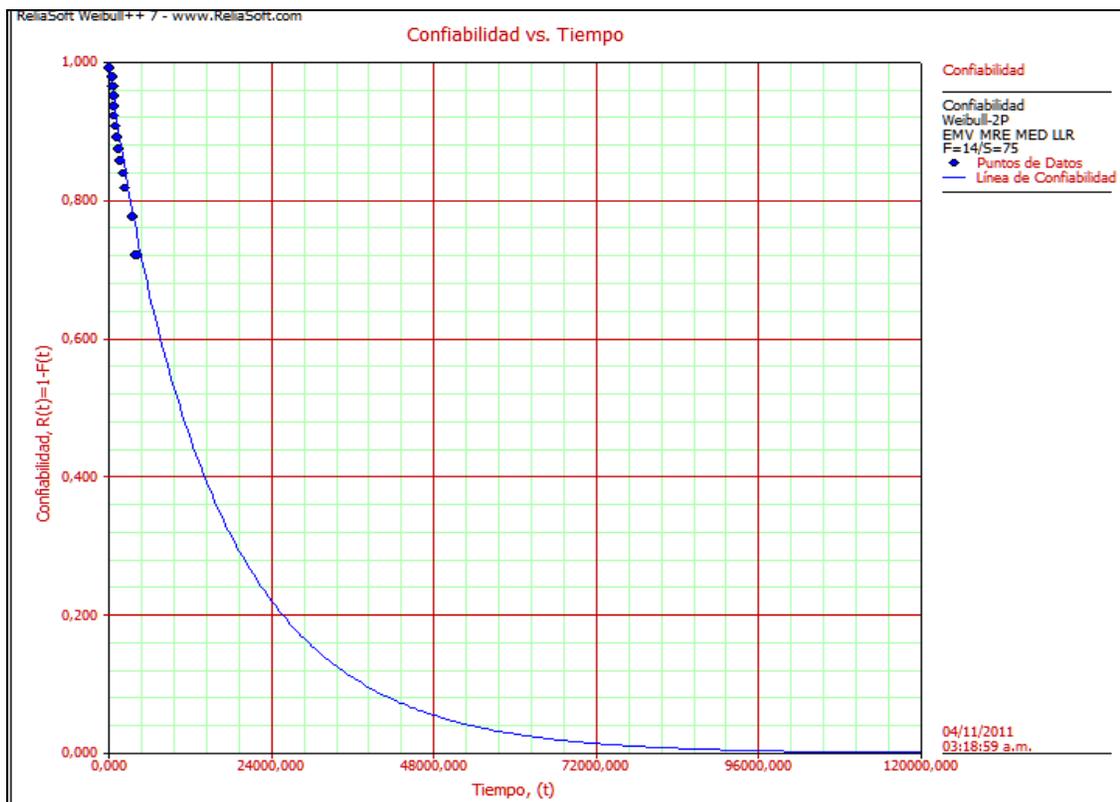
### 5.2.3 Análisis CMD para el modo de falla PLU (Taponamiento)

Se realizarán análisis de Confiabilidad y Disponibilidad. Para estimar la confiabilidad se tomarán los datos de los históricos de falla generales, en donde los modos de falla restantes (diferentes a PLU) se analizan como datos suspendidos.

## Confiabilidad

A continuación se observa la gráfica de confiabilidad vs tiempo, del modo de falla PLU simulado a 500 horas. Para los históricos de este modo de falla se ajusta la distribución estadística log normal.

**Gráfica 19. Confiabilidad vs Tiempo para el modo de Falla PLU**



**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

En la gráfica 19 de función de densidad de probabilidad se evidencia que es su distribución es lognormal.

**Tabla 19. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla PLU**

Promedio	9,6009
Estd	1,8877

**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++® 7. IGgroup

### Parámetros de forma Lognormal

Se evidencia en los parámetros de forma, que el promedio de falla es de 9,6 horas y cuenta con una desviación estándar de 1,8877. Lo que se evidencia en la gráfica de confiabilidad vs tiempo.

### Disponibilidad

Para determinar la disponibilidad vs tiempo del modo de falla PLU, se deben usar únicamente los datos ligados al respectivo modo de falla en los históricos generales del equipo. En la tabla 20 se observan los datos usados. Grafica 20.

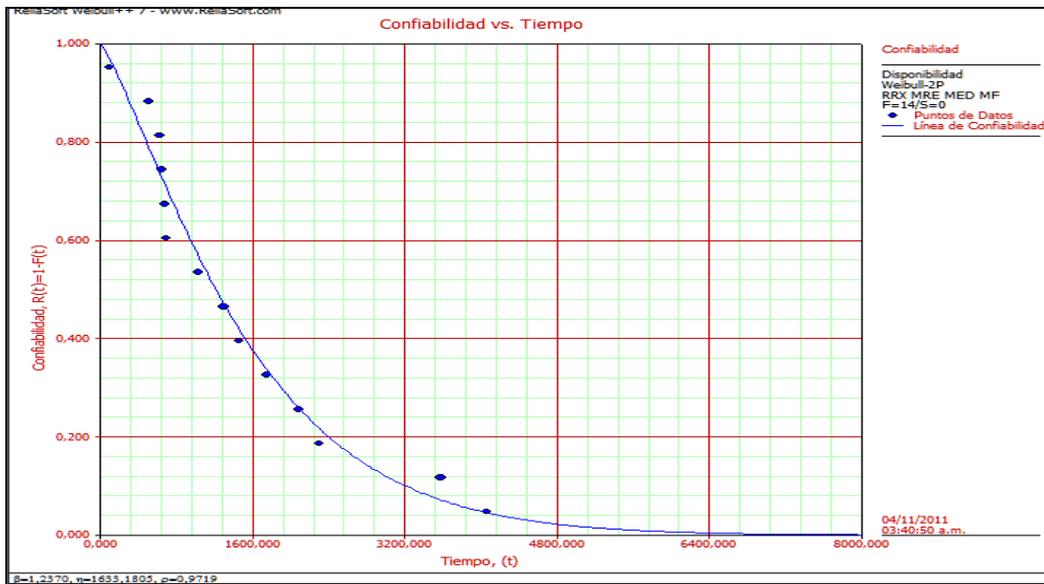
**Tabla 20. Datos modo de falla PLU usados para estimar la disponibilidad**

Tiempo de Falla (hr)	Modo de Falla
98	PLU
504	PLU
624	PLU
648	PLU
672	PLU
696	PLU
1032	PLU
1296	PLU

Tiempo de Falla (hr)	Modo de Falla
1464	PLU
1752	PLU
2088	PLU
2304	PLU
3576	PLU
4056	PLU

Fuente: Manual de aplicación y sistema erp\* "Ecopetrol"

**Grafica 20. Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla PLU**



Fuente: Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

**Tabla 21. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla PLU**

Beta	1,2370
Eta	1633,1805

Fuente: Reliasoft Corporation. Weibull++® 7. IGgroup

Se evidencia en los parámetros de forma, que el valor del Beta (según la curva de Davies o de la bañera) se cercano a 1, su valor es de 1,23. Esto indica que este modo de falla es se encuentra en su vida útil.

El valor de Eta evidencia que el MTTF es de 1633,18 horas que indica el tiempo medio para fallar.

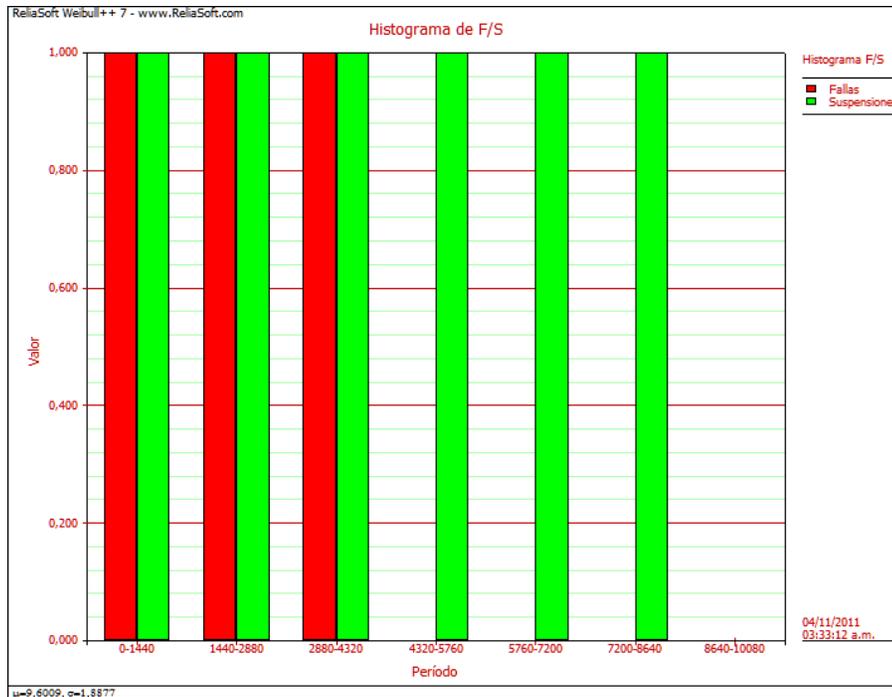
Y el valor de gamma es de 0 horas lo que evidencia arranca sin disponibilidad. Este parámetro indica el momento en el que se va a presentar la primera falla en la operación, y se evidencia aún mejor en la gráfica 21 que relaciona la Función de Densidad de Probabilidad del equipo.

**Gráfica 21. Curva función densidad de probabilidad de la disponibilidad del modo de falla PLU**



**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

## Gráfica 22. Histograma de fallas comparando análisis de datos suspendidos para un tiempo de 1440 horas, 2 meses.



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

En el histograma anterior, se observa la relación del modo de falla PLU con el resto a intervalos de 1440 horas (2 meses).

- En el Primer bimestre se presentarían 8 eventos PLU vs 28 datos suspendidos.
- En el 2 bimestre se presentarían 4 eventos PLU vs 18 datos suspendidos.
- En el 3 bimestre se presentarían 2 eventos PLU vs 18 datos suspendidos.
- En el 4 bimestre se presentarían 0 eventos LOA vs 8 datos suspendidos.

### 5.2.4 Análisis CMD para el modo de falla PV (Preventivo)

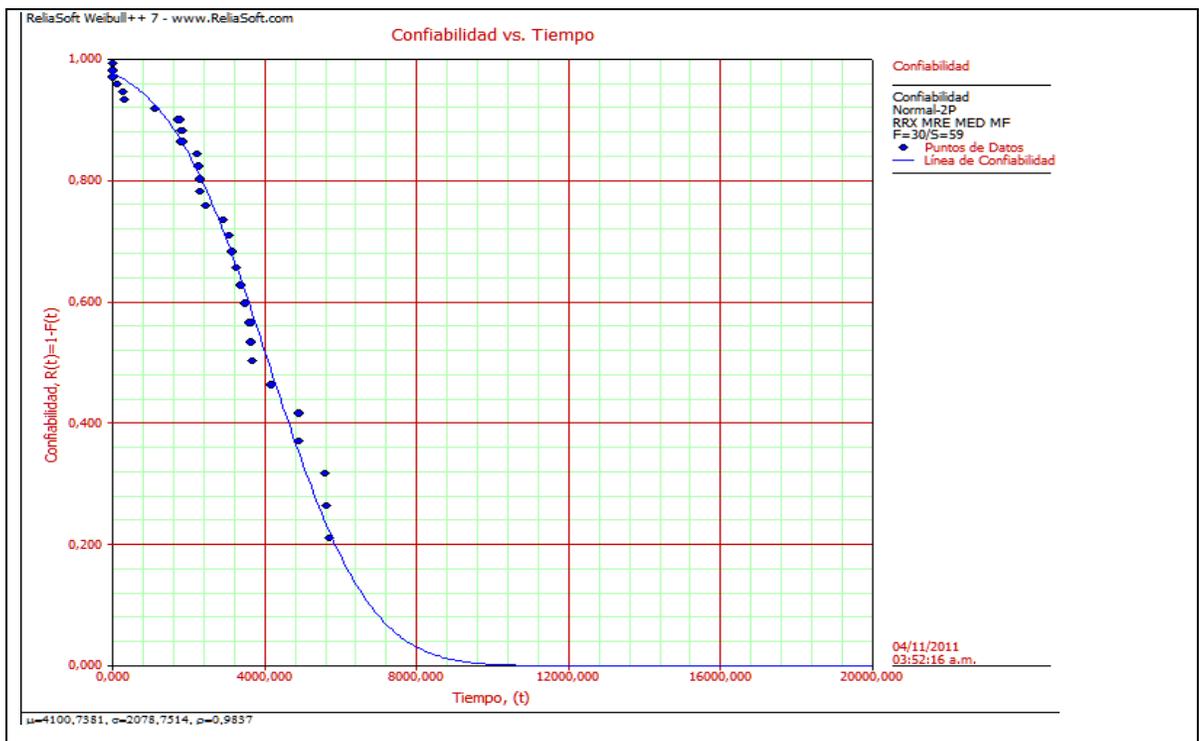
Se realizarán análisis de Confiabilidad y Disponibilidad. Para estimar la confiabilidad se tomarán los datos de los históricos de falla generales, en donde

los modos de falla restantes (diferentes a PV) se analizan como datos suspendidos.

## Confiabilidad

A continuación se observa la gráfica 23 de confiabilidad vs tiempo, del modo de falla PV simulado a 500 horas. Para los históricos de este modo de falla se ajusta la distribución estadística lognormal.

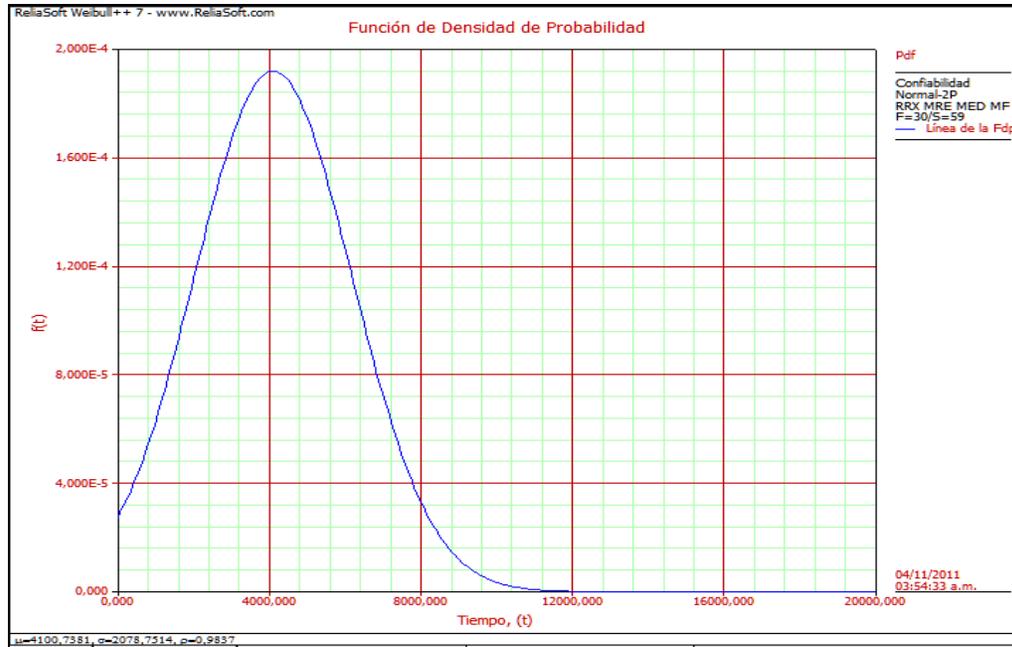
**Gráfica 23. Confiabilidad vs Tiempo para el modo de Falla PV**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

En la gráfica 24 de función de densidad de probabilidad se evidencia que es su distribución es lognormal

**Gráfica 24. Función de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla PV**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

**Tabla 22. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla PV**

Promedio	4100,7381
Estad	2078,7514

**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++® 7. IGgroup

**Parámetros de forma lognormal**

Se evidencia en los parámetros de forma, que el promedio de falla es de 4100,7 horas y cuenta con una desviación estándar de 2078,75. Lo que se evidencia en la gráfica de confiabilidad vs tiempo.

## Disponibilidad

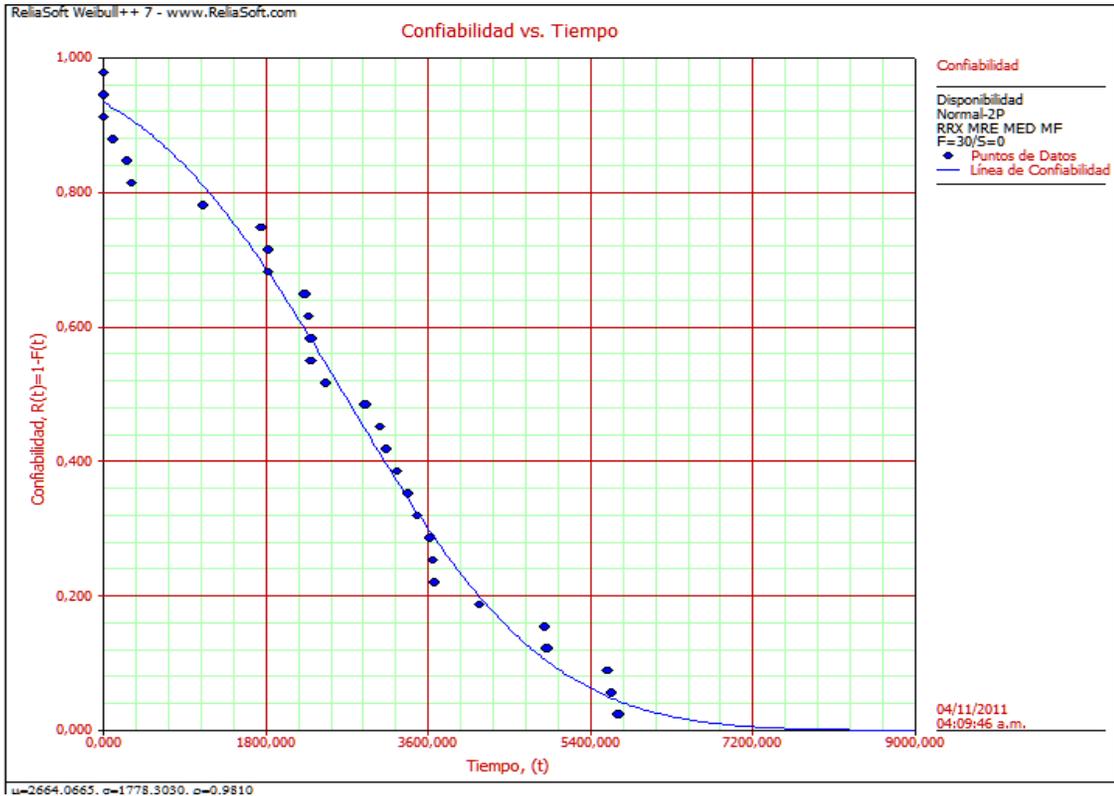
Para determinar la disponibilidad vs tiempo del modo de falla PV, se deben usar únicamente los datos ligados al respectivo modo de falla en los históricos generales del equipo. En la tabla 22 se observan los datos usados.

**Tabla 23. Datos Modo de falla PV usados para estimar la disponibilidad**

Tiempo de Falla (hr)	Modo de Falla
4	PV
4	PV
6	PV
108	PV
264	PV
312	PV
1104	PV
1752	PV
1824	PV
1824	PV
2232	PV
2280	PV
2304	PV
2304	PV
2472	PV
2904	PV
3072	PV
3144	PV
3264	PV
3384	PV
3480	PV
3624	PV
3648	PV
3672	PV
4176	PV
4896	PV
4920	PV
5592	PV
5640	PV
5712	PV

**Fuente:** Manual de aplicación y sistema erp\* "Ecopetrol"

**Gráfica 25. Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla PV**



**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

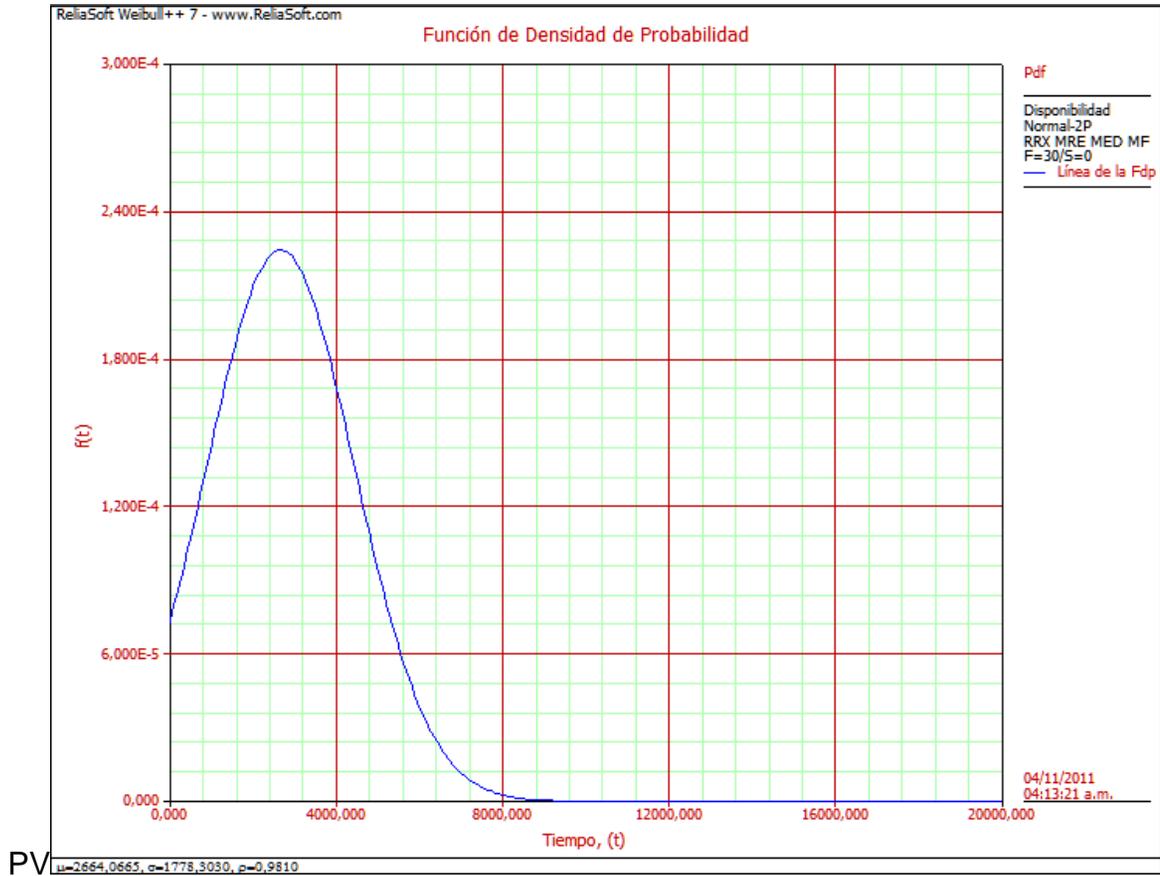
**Tabla 24. Resultados Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla PV**

Promedio	2664,0665
Estd	1778,3030

**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++® 7. IGgroup

Se evidencia en los parámetros de forma, que se ajusta a una distribución normal donde su promedio se encuentra en 2664,06 horas a una desviación estándar de 1778,30. Y se evidencia en la gráfica de función de densidad de probabilidad. Gráfica 26.

**Gráfica 26. Curva función densidad de probabilidad de la disponibilidad del modo de falla**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

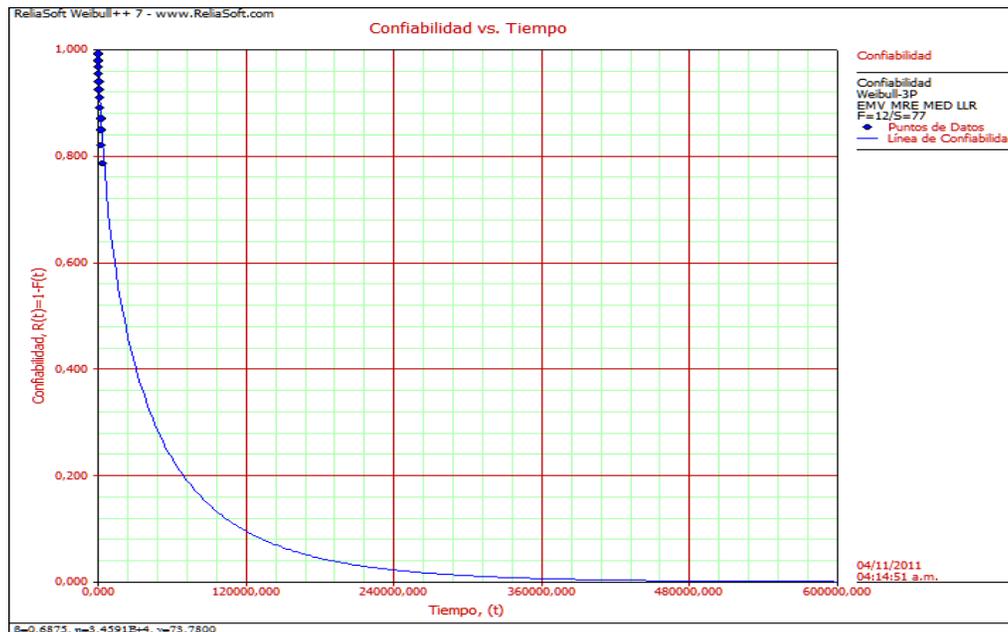
### 5.2.5 Análisis CMD para el modo de falla VIB (Vibración)

Se realizaran análisis de Confiabilidad y Disponibilidad. Para estimar la confiabilidad se tomaran los datos de los históricos de falla generales, en donde los modos de falla restantes (diferentes a VIB) se analizan como datos suspendidos.

## Confiabilidad

A continuación se observa la gráfica 27 de confiabilidad vs tiempo, del modo de falla VIB simulado a 500 horas. Para los históricos de este modo de falla se ajusta la distribución estadística Weibull 3 parámetros.

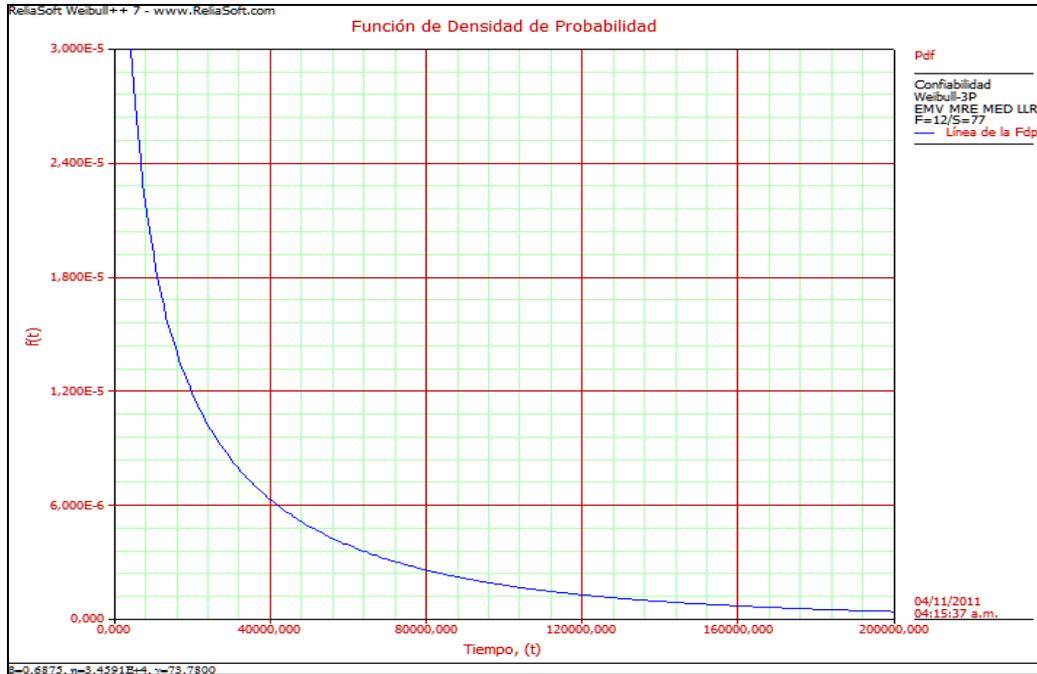
**Gráfica 27. Confiabilidad vs Tiempo para el modo de Falla VIB**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

En la gráfica 28 de función de densidad de probabilidad se evidencia que es su distribución es Weibull 3 parámetros.

**Gráfica 28. Función de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla VIB**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

**Tabla 25. Resultados de Densidad de Probabilidad para la Confiabilidad del Modo de Falla VIB**

Beta	0,6875
Eta	3,4591E+4
Gamma	73,7800

**Fuente:** ReliasoftCorporation. Weibull++® 7. IGgroup

**Parámetros de forma Weibull 3 parámetros**

Se evidencia en los parámetros de forma, que el valor del Beta (según la curva de Davies o de la bañera) se encuentra por debajo de 1. Razón por la cual, este modo de falla, en este momento, presenta fallas recurrentes debido al estado de vida en relación al modo, dado que se encuentra en infantil.

El valor de Eta evidencia que el MTBF es de 34590 horas que indica el tiempo medio entre fallas.

Su eta indica que este modo de falla se ha presentado desde la hora 73,78 de funcionamiento, para la primera falla.

### **Disponibilidad**

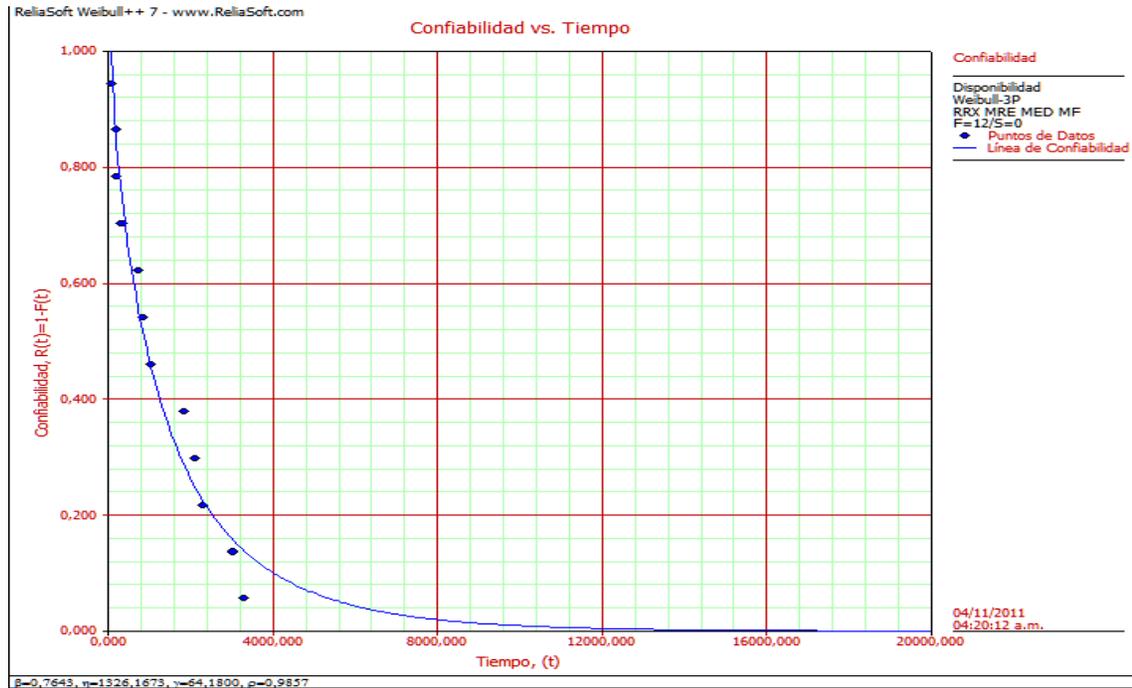
Para determinar la disponibilidad vs tiempo del modo de falla VIB, se deben usar únicamente los datos ligados al respectivo modo de falla en los históricos generales del equipo. En la tabla 25 se observan los datos usados. Grafica 29.

**Tabla 26. Datos modo de falla VIB usados para estimar la disponibilidad**

<b>Tiempo de Falla (hr)</b>	<b>Modo de Falla</b>
96	VIB
192	VIB
216	VIB
336	VIB
744	VIB
864	VIB
1056	VIB
1848	VIB
2112	VIB
2304	VIB
3024	VIB
3312	VIB

**Fuente:** Manual de aplicación y sistema erp\* "Ecopetrol"

### Grafica 29. Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla VIB



Fuente: Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

Tabla 27. Resultados de Disponibilidad vs Tiempo del modo de falla VIB

Beta	0,7643
Eta	1326,1673
Gamma	64,1800

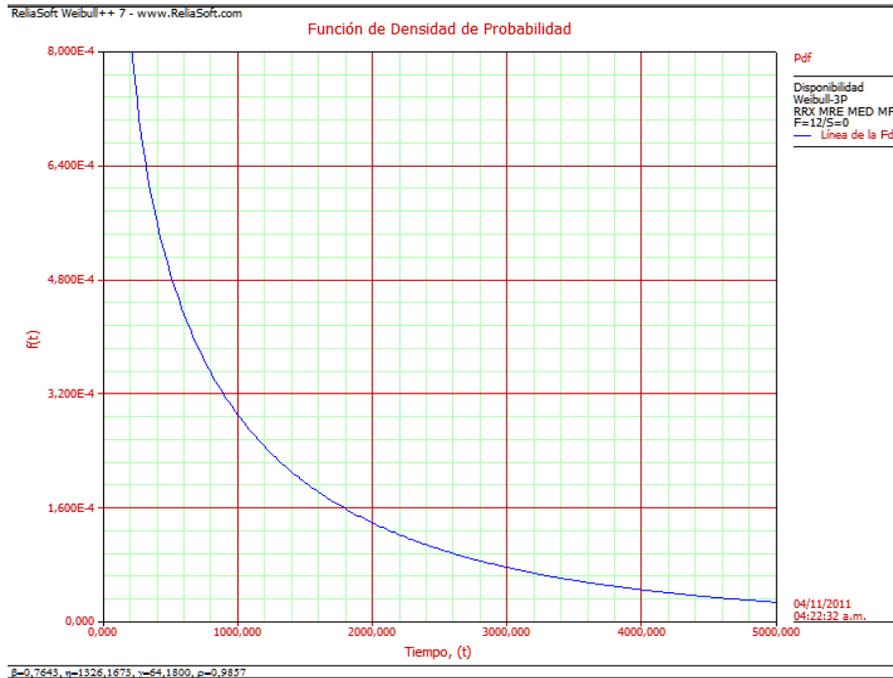
Fuente: Reliasoft Corporation. Weibull++® 7. IGgroup

Se evidencia en los parámetros de forma, que el valor del Beta (según la curva de Davies o de la bañera) se encuentra por debajo de 1. No es tan disponible para trabajar debido a que se encuentra en la etapa infantil, ya que se presentan fallas recurrentes

El valor de Eta evidencia que el MTTF es de 1326,16 horas que indica el tiempo medio para fallar.

Y el valor de gamma es de 64,18 horas lo que evidencia que arranca con cierta disponibilidad. Figura 30.

**Gráfica 30. Curva función densidad de probabilidad de la disponibilidad del modo de falla**

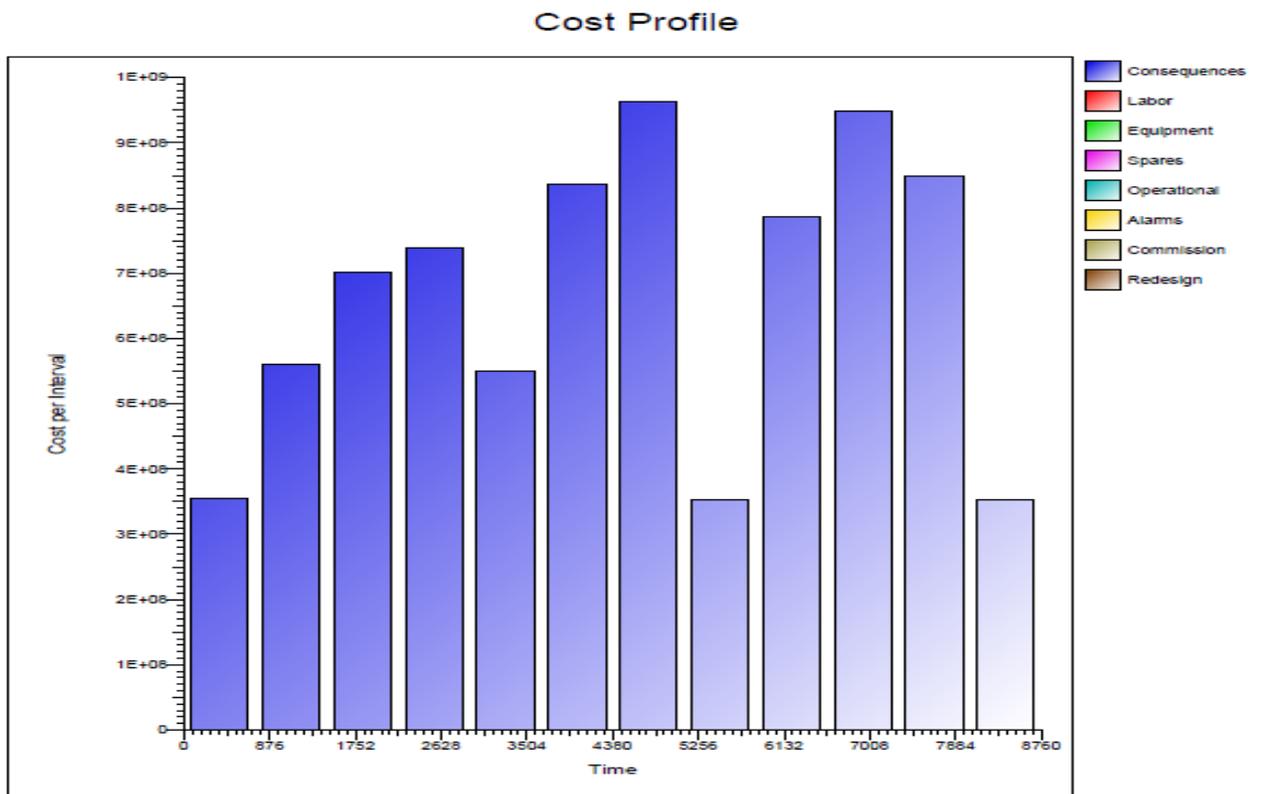


**Fuente:** Reliasoft Corporation. Weibull++ ® 7. IGgroup

## 6. ANALISIS DE COSTO

Con el propósito de efectuar una proyección de datos de costos de mantenimientos preventivos y correctivos de las bombas, basados en el análisis de los modos de fallas, en donde toman parte los valores de repuestos, reparación y mano de obra. A partir de dichos análisis se relacionaron dos tipos de comportamiento. Grafica 31.

**Grafica 31. Costo proyectado cada 3 meses**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. BlockSim ® 7. IGgroup

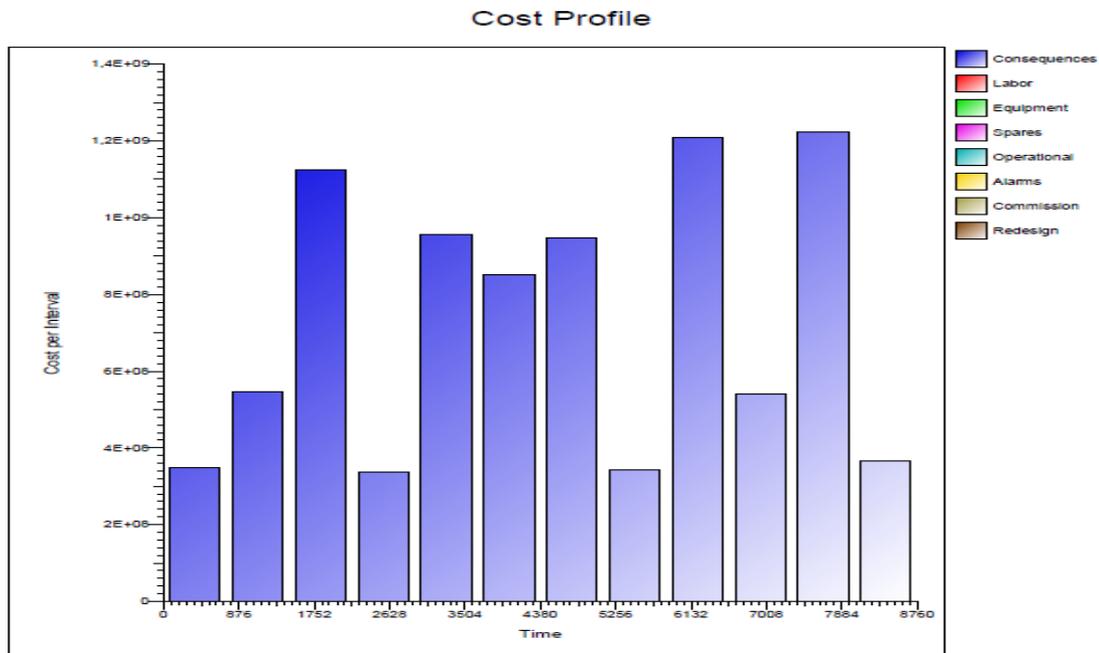
Según este comportamiento el costo por mantenimiento son bajos y los costos por reparación son más altos con base en los datos de “ETA” o “MTBF”

La tasa de mortalidad por este tipo de mantenimiento es más alta lo que impacta los costos por reparación. Se observa una tendencia al crecimiento del tiempo de servicio “Beta” mostrando un alto costo en el mantenimiento correctivo. (Tiempo de Servicio o Vida útil).

Los costos de las fallas tienden a aumentar por la baja frecuencia de mantenimiento.

Al efectuar el ejercicio con una confiabilidad del 90% encontramos que los tiempos operacionales aumentan con una alta confiabilidad.

**Grafica 32. Costo proyectado cada 2 meses**



**Fuente:** ReliasoftCorporation. BlockSim ® 7. IGgroup

Según este comportamiento el costo por mantenimiento es mucho más alto pero los costos por reparación bajan. Grafica 32.

La tasa de mortalidad por este tipo de mantenimiento es más baja lo que disminuye los costos por reparación. Se observa una tendencia al crecimiento del tiempo de servicio "ETA" disminuye el costo por reparación.

Al efectuar el ejercicio con una confiabilidad del 90% encontramos que los tiempos operacionales disminuyen con una alta confiabilidad.

## 7. CONCLUSIONES

Encontramos que las fallas se están presentando en la etapa de la vida útil entre 0,95 y 1,95 lo que en comparación con la curva de Davies es un comportamiento fuera de lo normal pues esta etapa debería presentar un comportamiento estable.

- Inadecuado diseño del sistema de aspersión pues no se conservan los parámetros adecuados de distancia para las bombas verticales tipo sumidero generando cavitación.
- Debido a las altas temperaturas del agua que ingresan al foso se generan burbujas que generan cavitación en la bomba.
- Por causa a la gran cantidad de lodos, sedimentos del procesos de extracción de crudos y residuos del montaje e instalación, se presentan taponamientos frecuentes de los filtros en la succión de la bomba
- Mala selección de equipos para este tipo de trabajo ya que presenta una alta tasa de fallas en donde evidencio que origen eran los rodamiento, pues no eran adecuados para este tipo de trabajo
- Falta de seguimiento de los trabajos externos por parte de interventoria

Se evidencia que la curva de Confiabilidad del sistema de aspersión es baja reflejada por la alta inclinación de la pendiente en el tiempo.

Los equipos se encuentran en un estado de vida útil con incremento en su Beta.

El Eta o MTBF es de 2580 horas, estos son consecuencia de los modos de falla que más impactan, PLU "Taponamiento y restricción", NOI "Ruido", OHE "Sobrecalentamiento" y VIB "Vibración", a continuación se presenta una tabla en donde se ven las causas que los ocasionan:

## **MODO DE FALLA POR RUIDO**

Bomba no preparada o mal preparada

- Baja entrega de líquido, la disminución de caudal y la baja presión de descarga de la bomba. Además se puede presentar un flujo intermitente del líquido.

Válvula de succión y descarga cerrada u obstruida.

- El sistema presenta baja entrega de líquido, insuficiente entrega de caudal y además ocasiona baja presión en la bomba.

Insuficiente NSPH disponible.

- El sistema presenta baja entrega de líquido, insuficiente entrega de caudal y además ocasiona baja presión en la bomba.
- Se presenta una alta tasa de falla de los sellos mecánicos.
- Se presenta un alto nivel de vibraciones excediendo los límites normales.
- Se tiene alto desgaste acelerado de los componentes internos de la bomba como son bujes, rodamientos, empeller y otros.

Impeler desbalanceado.

- Se generan fallas continuas en rodamientos o recalentamiento de los mismos.
- Se presenta fallas continuas en sellos mecánicos.
- Alto vibración de la bomba excediendo los niveles normales de operación.

Ajuste en rodamientos.

- Se presenta recalentamiento de rodamientos y fallas continuas del mismo.
- Se presenta un alto desgaste de los compuestos internos de la bomba.
- Se presenta un alto consumo de potencia del motor.
- Se tiene un alto desaliniamiento del sistema conjunto motor bomba.

- Inadecuada lubricación de rodamientos y demás componentes del sistema como bujes.
- Mezcla de lubricantes inadecuados cuando se realiza este tipo de mantenimiento.

### **MODO DE FALLA POR VIBRACION.**

Se presenta insuficiente NSPH de la bomba

- El sistema presenta baja entrega de líquido, insuficiente entrega de caudal y además ocasiona baja presión en la bomba.
- Se presenta una alta tasa de falla de los sellos mecánicos.

Impeler roto o paletas averiadas.

- Genera deficiencia de entrega de caudal y baja presión de la bomba
- Recalentamiento en rodamientos generándonos una alta vibración.

Impulsor desbalanceado.

- Genera falla en rodamiento y componentes de la bomba.
- Se presenta avería en sello mecánico.
- Una alta vibración en el conjunto motor bomba.

Inadecuada lubricación y diferentes mezcla de lubricantes

- Generando una alta temperatura y mortalidad de rodamiento, desgaste de buje y ejes de las bomba.

### **MODO DE FALLA POR SOBRECALENTAMIENTO.**

- Válvulas de succión cerradas u obstruidas.
- Baja entrega de líquido, la disminución de caudal y la baja presión de descarga de la bomba. Además se puede presentar un flujo intermitente del líquido.

Lubricación inadecuada.

- Alta temperatura en rodamientos, daños en sellos mecánicos y alta vibración en el sistema.

Rodamientos instalados inadecuadamente.

- Alta temperatura en rodamientos y falla de los mismos, daños en sellos mecánicos y alta vibración en el sistema.

Inadecuado funcionamiento de bomba o en seco.

- Daño eminente en sellos mecánicos. Y componentes del conjunto motor bomba.
- Daño de voluta por cavitación.

### **MODO DE FALLA POR PERDIDA DE CARGA.**

Excesivo aire atrapado en el fluido.

- Se presenta una insuficiente entrega de caudal y baja presión en el sistema, generado una entrega de flujo intermitente.

Impeler roto o paletas averiadas.

- Perdida fluido de operación de bomba, daño en rodamientos y vibraciones altas.
- Daño de componentes internos de la bomba tales como sellos, voluta, eje, rodamientos.

El Gama es el valor negativo que evidencia la presencia de fallas operacionales y fallas de montaje, esto por falta de conocimientos de los equipos, falta de información en manuales, por falta de interventoría en el montaje, ausencia de lista de chequeo para arranque. (Presión, temperatura, ajuste) entre otras.

Se debe hacer seguimiento y tener una base de datos de mayor proporción para identificar con mayor claridad los modos de falla.

El análisis impacta Disponibilidad debido a un alta frecuencia de modos de fallas LOA. La cual es una falla por perdida de carga producida por cavitación.

Fenómeno ocasionado por baja presión y alto vacío consecuencia del taponamiento de la bomba. NPSH de trabajo se encuentre negativo, mal diseño del sistema y alta temperatura del fluido en el foso de succión de la bomba.

## 8. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones emitidas son propuestas para la mitigación de las fallas analizadas en este proyecto.

Con el propósito de aumentar la vida útil de los equipos y mejorar las condiciones operacionales de los mismo y garantizando la disponibilidad operación de la estación.

- Realizar de carácter urgente RCM con el propósito de generar tareas de mantenimiento preventivo. Para mitigar las fallas estudiadas en este proyecto y garantizar alto tiempo de operación.
- Realizar FMEA con el propósito prevenir problemas, reducir costos e identificar fallas que poseen las consecuencias más serias en términos de seguridad, de producción, financieros.
- Tener una base de datos donde contenga, fechas. Hora de la falla, modo de falla. Tiempo operacional, tiempo fuera de servicio, tiempo fuera de control y tiempo de reparación. Donde se mejorara el análisis estadístico.
- Realizar procedimiento general de engrasado de bombas y motores verticales de la estación acacias.
- Calcular la frecuencia de lubricación para bombas verticales. Tener encuentra las diferencias dentro del sistema donde se encuentran las bombas del sistema de aspersión.
- Verificar si las rutinas de lubricación propuestas están acopladas a la estrategia. planteada en el sistema elipse.
- Verificar si la frecuencia establecida de lubricación es la más adecuada.
- Realizar capacitaciones de lubricación necesarias a personal técnico, como operadores.

- Realizar procedimiento de ensamble y desensamble de bombas verticales, incluir la verificación del paralelismo de los tazones.
- Dar un concepto CIC sobre el diseño más adecuado para bujes centralizadores de bronce lubricados por grasa.
- Realizar concepto CIC sobre la reposición de equipos para las bombas Hidromac de Aspersión de la estación Acacias1
- Verificar si el tipo de material usado en los bujes es el más adecuado.
- Realizar las pruebas de espejo para una de las bombas de los sistemas donde se encuentran las bombas Hidromac en la estación Acacias. Y desarrollar el procedimiento de operación de las bombas Hidromac del sistema de aspersión Acacias.
- Solicitar información a los fabricantes y representantes de bombas en Colombia si se pueden realizar las pruebas para determinar el NPSHr
- Revisar y Corregir el tiro de la tubería y posición de la voluta de las bombas del sistema de aspersión. Si es necesario.
- Establecer unas frecuencias de revisión de la succión de la bomba, por taponamiento de rejillas por mugre.
- Se debe seleccionar un rodamiento homólogo de rodillos para la bomba, ya que esta posee un rodamiento de doble hilera de bolas el cual se utiliza en mayor proporción para cargas radiales.
- Seleccionar un acople rígido para el conjunto AP7364B.
- Solicitar a Ecopetrol tener un stop de repuestos en la bodega como eje, bujes, rotor y caracol. Co el propósito de mejorar los tiempos de medios de falla, tiempos operacionales y reparación de la bomba.
- Solicitar por parte del grupo de ingeniería hacer un análisis del recibo de aguas residuales que son descargadas por empresas contratistas y de perforación. (niveles de cloruros, pH, sulfatos y dureza.

## BIBLIOGRAFIA

- GONZALES JAIMES, Isnardo. Seminario I : La investigación científica Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander 1998. 95 p.
- NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 1486. Documentación. Presentación tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Actualización Julio 2008. Completa.
- GONZALES BOHORQUES Carlos Ramón. Principios de Mantenimiento Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander 2006.
- MORA GUTIERREZ, Alberto. Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios. Medellín. AMG. 2005.
- MOUBRAY, John. RCM II. Reliability Centered Maintenance Edición en español. Gran Bretaña: Aladon 2004.
- CRITICALITY ANALYSIS FOR MAINTENANCE PURPOSES, NORZOK STANDAR Z-008 Rev 2, Noviembre de 2001.
- WOLTER J. Fabryky. Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. Maestría. España 1997.
- BALBIR S. DHILLON, "Quality Control, Reliability and Engineering Design". Industrial Engineering. New York – USA. 1985.

- ORTIZ PLATA, Daniel. Organizaciones del Mantenimiento. Mantenimiento Centrado en confiabilidad RCM. Bogotá 2010 CD. Posgrado Gerencia de Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander.
- WEIBULL ++ ® 7.ReliaSoft Corporation Copyright 1992 – 2007. IGgroup.[www.reliasoft.com](http://www.reliasoft.com)
- BLOCKSIM® 7.ReliaSoft Corporation Copyright 1992 – 2007.IGgroup.[www.reliasoft.com](http://www.reliasoft.com)

## ANEXO

**Anexo. A. Ejemplo de tabla utilizada para la determinación de síntomas y fallas hidráulicas y mecánicas en bombas.**

Síntoma	Fallas hidráulicas				Fallas mecánicas					
	Bomba no entrega líquido	Bomba no entrega suficiente caudal	Bomba no entrega suficiente presión	Bomba entrega flujo intermitentemente	Rodamientos se recalientan o fallan regularmente	Sellos mecánicos fallan con frecuencia	Empaquetaduras tienen corta vida	Vibraciones de la bomba exceden los niveles normales	Bomba consume mucha potencia	Desgaste acelerado de partes internas
<b>Causa</b>										
Bomba no preparada o mal preparada	x	x	x	x						
Válvulas de succión y/o descarga cerradas u obstruidas.	x	x	x				x			
Insuficiente NPSH disponible	x	x	x			x	x			x
Excesivo aire atrapado en el fluido	x	x	x	x						
Velocidad (rpm) muy baja	x	x	x							
Rotación incorrecta del impeler		x							x	
Impeler roto o paletas averiadas		x	x		x		x			
Impeler o diámetro del impeler incorrecto		x	x							
Cabeza del sistema muy alta		x								
Instrumentos dan lecturas erróneas		x	x							
Entrada de aire en la línea de succión				x						
Excesivo desalineamiento del eje					x	x		x		
Lubricación inadecuada					x					
Contaminación del lubricante					x					
Fuerza axial o cargas radiales mayores que el grado del rodamiento					x					
Mezcla de lubricación inadecuada					x			x		
Presión de succión muy alta					x	x				
Rodamientos instalados incorrectamente					x	x		x		
Impeler desbalanceado					x	x		x		
Sobrecalentamiento de las caras de los sellos						x				
Deflexión excesiva del eje					x	x		x		
Instalación incorrecta de los sellos						x				
La bomba está funcionando en seco						x				
La bomba funciona fuera del punto de diseño					x	x	x	x	x	
Empaquetaduras instaladas incorrectamente							x			
Impeler bloqueado	x							x		
Bomba operando a velocidad cercana a la frecuencia natural del sistema								x		

NEPA, 57, 1993.