

UNA PROPUESTA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA DISPONIBILIDAD DE  
INYECCION DE LA PLANTA CINCO DE LA SUPERINTENDENCIA DE  
OPERACIONES LA CIRA INFANTAS USANDO HERRAMIENTAS DE  
SIMULACION

ALEXANDER MIGUEL MORA SILVA  
WILLIAM ARLEY BONILLA FELIZOLA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA  
2010

UNA PROPUESTA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA DISPONIBILIDAD DE  
INYECCION DE LA PLANTA CINCO DE LA SUPERINTENDENCIA DE  
OPERACIONES LA CIRA INFANTAS USANDO HERRAMIENTAS DE  
SIMULACION

ALEXANDER MIGUEL MORA SILVA  
WILLIAM ARLEY BONILLA FELIZOLA

Monografía para optar al título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director:

Ing. Rodrigo Alonso Manzano  
Especialista en Gerencia de Mantenimiento

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

2010

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su agradecimiento a: A dios, por encausarme siempre por el camino del bien, del compromiso y de la honestidad.

A mi familia por todo el apoyo brindado, a mi esposa por su paciencia y comprensión en este camino.

Dedico este triunfo a mi hijo por ser también una razón para terminar este ciclo.

Al Ecopetrol S.A, la Superintendencia la Cira Infantas, por acogerme en este estudio.

Alexander

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su agradecimiento a: A dios, por encausarme siempre por el camino del bien, del compromiso y de la honestidad.

A mi madre por su acompañamiento y apoyo en todos mis proyectos, ella sirvió de inspiración para iniciar y culminar esta etapa de mi vida y seguir adelante en el camino. Un triunfo más para ti Mamá.

A mis sobrinos Rolando y Valentina para que desde ya, vean en el estudio, una oportunidad de desarrollo en sus vidas.

A mi compañera por su paciencia y entendimiento en todo este tiempo.

AL grupo de docentes, profesionales y auxiliares de la especialización en Gerencia de Mantenimiento de la Universidad Industrial de Santander, por todo el conocimiento compartido, enseñanzas profesionales y atención en cada ciclo.

Al Ecopetrol S.A, la Superintendencia la Cira Infantas, por acogerme en este estudio.

William

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	17
1. CONCEPTOS TEORICOS	18
1.1 DISTRIBUCION WEIBULL	18
1.1.1 Función de confiabilidad	19
1.1.2 Función de densidad de probabilidad de falla	20
1.1.3 Función de tasa de falla	21
1.1.4 Parámetros de la distribución WEIBULL	22
1.2 CONCEPTOS DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD	24
1.2.1 Concepto de confiabilidad	24
1.2.2 Concepto de mantenibilidad	26
1.2.3 Concepto de disponibilidad	30
1.2.4 Relación entre confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD)	33
2.1 DESCRIPCION DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS	36
2.1.1 Descripción del proceso de inyección de agua	38
3.1 PREPARACION DE LA INFORMACION	40
3.2 DIAGNOSTICO SEGÚN ANALISIS DE DATOS EN WEIBULL ++ 7	49
3.3 DISPONIBILIDAD GENERICA E INDICADORES DE MANTENIBILIDAD Y CONFIABILIDAD DE LOS EQUIPOS DE INYECCION	63
3.4 EVALUACION DE LA DISPONIBILIDAD DE LOS EQUIPOS DE INYECCION DE LA PIA 5	66

4. PROPUESTA PARA LA MEJORA DE LA DISPONIBILIDAD DE INYECCION DE LA PIA 5.	69
4.1 BOMBA CENTRILIF-MOTOR ELECTRICO	69
4.1.1 Confiabilidad y disponibilidad en motores eléctricos de media tensión	71
4.1.2 Confiabilidad y disponibilidad en bomba multietapas	72
4.2 EVALUACION COSTO/BENEFICIO EN LA REPOSICION DE LOS EQUIPOS TURBINA-BOMBA CENTRIFUGA POR MOTOR ELECTRICO-BOMBA MULTIETAPAS EN LA PLANTA DE INYECCION 5 PIA 5	74
4.2.1 Evaluación del riesgo en el cambio de los equipos de inyección	76
5. CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFIA	81

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetro de forma WEIBULL	19
Tabla 2. Característica del parámetro de forma WEIBULL	19
Tabla 3. Diagnostico de confiabilidad Turbobomba 1	51
Tabla 4. Diagnostico de confiabilidad Turbobomba 2	54
Tabla 5. Diagnostico de confiabilidad Turbobomba 3	57
Tabla 6. Diagnostico de confiabilidad Turbobomba 5	59
Tabla 7. Diagnostico de confiabilidad Turbobomba 6	62
Tabla 8. Indicadores de mantenibilidad y confiabilidad Turbobombas	64
Tabla 9. Capacidad de inyección de agua por día de Turbobombas PIA 5 según disponibilidad genérica WEIBULL	67
Tabla 10. Probabilidad de falla y tiempo para reparar	77
Tabla 11. Disponibilidad de inyección con equipos propuestos	77
Tabla 12. Análisis del riesgo en la reposición de los equipos	77
Tabla 13. Relación costo beneficio de la reposición de los equipos	78

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Función de confiabilidad WEIBULL	20
Figura 2. Función de densidad de probabilidad de falla para la distribución WEIBULL	21
Figura 3. Función de tasa de fallas para la distribución Weibull	22
Figura 4. Perfil de funcionalidad	27
Figura 5. Duración incierta del tiempo de recuperación	29
Figura 6. Relación entre confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad	34
Figura 7. Grafica de producción del campo la Cira Infantas	37
Figura 8. Vista panorámica Turbobombas PIA 5 campo la Cira Infantas	39
Figura 9. Malos actores Turbobomba 1 PIA5	41
Figura 10. Malos actores Turbobomba 2 PIA5	42
Figura 11. Malos actores Turbobomba 3 PIA5	43
Figura 12. Malos actores Turbobomba 5 PIA5	44
Figura 13. Malos actores Turbobomba 6 PIA5	45

Figura 14. Malos actores Bombas BJ PIA5	46
Figura 15. Bomba centrífuga Bayron Jackson PIA5	47
Figura 16. Malos actores Turbinas PIA5	48
Figura 17. Turbina Solar PIA5	49
Figura 18. Confiabilidad Turbobomba 1	52
Figura 19. Confiabilidad Turbobomba 2	55
Figura 20. Confiabilidad Turbobomba 3	57
Figura 21. Confiabilidad Turbobomba 5	60
Figura 22. Confiabilidad Turbobomba 6	63
Figura 23. Confiabilidad y mantenibilidad Turbobombas planta de inyección 5	64
Figura 24. Disponibilidad genérica en Turbobombas planta de inyección 5	65
Figura 25. Conjunto motor bomba instalado en la PIA5A	71

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. TIEMPOS DE OPERACIÓN EN HORAS HASTA LA FALLA TURBOBOMBAS PIA5	84
ANEXO B. INFORME RESUMEN DE MODELAMIENTO WEIBULL DE LAS TURBOBOMBAS DE LA PIA 5	89

## RESUMEN

**TITULO:** *UNA PROPUESTA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA DISPONIBILIDAD DE INYECCION DE LA PLANTA CINCO DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES LA CIRA INFANTAS USANDO HERRAMIENTAS DE SIMULACION\**.

**AUTORES:** WILLIAM BONILLA FELIZOLA, ALEXANDER MORA SILVA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD, MANTENIBILIDAD

**DESCRIPCION O CONTENIDO:** Esta monografía desarrolla una propuesta para la mejora de la disponibilidad de inyección de agua, en la planta 5 de la superintendencia de operaciones la Cira Infantas, de Ecopetrol S.A, partiendo del análisis y modelamiento de confiabilidad, con la herramienta WEIBULL++7 de los equipos existentes en la planta, usados para la inyección de agua (recuperación secundaria). Como caso de estudio, en esta monografía, se diagnostica las condiciones de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los equipos usados en el proceso de recuperación secundaria, como lo son las Turbobombas instaladas en dicha planta. Este diagnostico se inicia con el cargue de los tiempos de operación hasta la falla de cada equipo, en el software WEIBULL++7 para simular distintas condiciones de operación. Una vez calculados los índices de confiabilidad, se procede a evaluar la disponibilidad frente a los requerimientos del campo con el fin de identificar alguna oportunidad de mejora en los equipos. La propuesta de reposición de las Turbobombas aquí descrita es evaluada frente a la disponibilidad requerida por el acuerdo de colaboración Ecopetrol S.A y OXY de Colombia, así como el riesgo de la misma. La reposición consiste en cambiar las 5 Turbobombas por 3 conjuntos motor eléctrico y bomba multietapa y un estambay. Estos equipos son idénticos a los usados en la planta 5A, cuyo proceso es de reinyección, el cual es muy similar al de inyección.

---

\* Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento,  
Director: Ing. Rodrigo Alonso Manzano Manzano

## SUMMARY

**TITLE:** *A PROPOSAL FOR THE IMPROVEMENT OF THE INJECTION AVAILABILITY IN THE PLANT NUMBER FIVE (5) INSIDE “LA CIRA INFANTAS” OPERATIONS SUPERINTENDENCE USING SIMULATION<sup>1\*</sup> TOOLS.*

**AUTHORS:** WILLIAM BONILLA FELIZOLA, ALEXANDER MORA SILVA\*\*

**CLUE WORDS:** RELIABILITY, AVAILABILITY, SUPPORT.

**DESCRIPTION OR CONTENT:** This monograph develops a proposal for the availability improvement in the water injection inside the plant number five (5) in “la Cira Infantas” operations superintendence, Ecopetrol S.A; starting from the analysis and reliability modeling, using WEIBULL++7 tool of the existing equipments inside the plant. These equipments are used for the water injection (secondary recovery). As case study, in this monograph there is a reliability, support and availability diagnosis of the used equipments in the secondary recovery process, such as Turbo-pumps installed on it. This diagnosis is started with the operation times load until the fail of each equipment in the WEIBULL++7 software in order to simulate several operation conditions. Once the reliability indexes have been calculated, we can evaluate the availability taking into account the field requirements in order to identify some kind of improvement in the equipments. The Turbo-pumps proposal reposition described in here is evaluated taking into account the required availability in the collaboration agreement between Ecopetrol S.A and OXY Colombia, so the risk in it. The reposition consists on changing the five (5) Turbo-pumps by 3 sets of electrical motor and multi-stage pump and stambay. These equipments are completely similar to the ones used in the plant number five A (5a), which process is about re-injection; this process is very similar to the injection one.

---

\* Monograph

\*\* School of Mechanical Engineering. Maintenance Management Specialization.

Director: Rodrigo Alonso Manzano Manzano

## INTRODUCCION

En un mundo tan globalizado donde las alianzas estratégicas entre las empresas petroleras para la explotación de las distintas reservas probadas en distintos lugares de la geografía colombiana, cobra un papel muy importante en el desarrollo económico de las regiones y del mismo sector que las explota; hacen que aspectos como: que tanta disponibilidad tienen sus activos, que confiabilidad ofrecen para un proceso en específico sean, las preguntas o credenciales a mostrar a la hora de suscribir algún tipo de alianza.

Ecopetrol S.A no es ajena a este fenómeno de globalización y en la gerencia para la cual trabajamos, Gerencia Regional del Magdalena Medio (GRMM), se encuentra que, en el campo la Cira Infantas se lleva a cabo un acuerdo de colaboración con Occidental de Colombia (OXY) desde el año 2006 y frente a las altas exigencias de disponibilidad alimentadas por la meta de producción, vemos una oportunidad de mejora en el proceso principal de este acuerdo, como lo es la recuperación secundaria o inyección de agua.

Esta monografía tiene una perspectiva práctica, puesto que el resultado del análisis está enfocado a mejorar la disponibilidad de los equipos usados para el proceso de inyección de agua en la planta 5 del que trata el acuerdo Ecopetrol S.A y OXY.

En este documento se encuentra un contenido teórico, tiempos de operación hasta la falla de los equipos en estudio, e indicadores de confiabilidad que permiten realizar un análisis en la herramienta WEIBULL++7, con el fin de generar diagnósticos que permitan identificar oportunidades de mejora en el proceso de inyección.

## 1. CONCEPTOS TEORICOS

### 1.1 DISTRIBUCION WEIBULL

Es una ecuación empírica, elaborada por Waloddi Weibull en el año 1951, aplicada en su estudio de resistencia a la fatiga de los materiales como el acero, cuando intentaba definir una distribución de probabilidad que describiera la expresión de confiabilidad en rodamientos de bolas.

La distribución WEIBULL queda definida por medio de los siguientes parámetros:

Parámetro de posición ( $\gamma$ ): indica el lapso en el cual la probabilidad de falla es nula.

Parámetro de escala o característica de vida ( $\eta$ ): su valor es determinante para fijar la vida útil del producto o del sistema. Cuando  $\eta = 0$  y  $\beta = 1$ , representa la vida útil.

Parámetro de forma ( $\beta$ ): refleja la dispersión de los datos y determina la forma que toma la distribución.

El parámetro  $\beta$  puede tener distintos valores sobre la recta numérica, lo que permite obtener diversas curvas una vez realizado el análisis. A continuación se resume los valores y característica que pueden tener<sup>2</sup>:

---

<sup>2</sup> DIAZ MATALOBOS, Ángel. Confiabilidad en mantenimiento. Caracas: IESA, 1992. p 21

Tabla 1. Parámetro de forma WEIBULL

VALOR	CARACTERISTICA
$\beta < 1$	TASA DE FALLA DECRECIENTE ( MORTALIDAD INFANTIL)
$\beta = 1$	TASA DE FALLA CONSTANTE (VIDA UTIL)
$\beta > 1$	TASA DE FALLA CRECIENTE (DESGASTE)

Fuente: DIAZ MATALOBOS, Ángel

Tabla 2. Característica del parámetro de forma WEIBULL

VALOR	CARACTERISTICA
$0 < \beta < 1$	TASA DE FALLA DECRECIENTE
$\beta = 1$	DISTRIBUCION EXPONENCIAL
$1 < \beta < 2$	TASA DE FALLA CRECIENTE, CONCAVA
$\beta = 2$	DISTRIBUCCION RAYLEIGH
$\beta > 2$	TASA DE FALLA CRECIENTE, CONVEXA
$3 \leq \beta \leq 4$	TASA DE FALLA CRECIENTE, DISTRIBUCION NORMAL SIMETRICA

Fuente: DIAZ MATALOBOS, Ángel

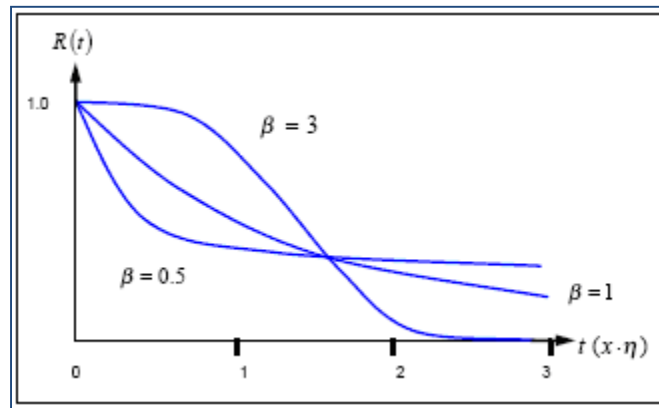
1.1.1 Función de confiabilidad. En su forma más general la distribución de WEIBULL trae consigo 3 parámetros, como se describió anteriormente; para los cual la función de confiabilidad toma la siguiente forma<sup>3</sup>:

---

<sup>3</sup> O'CONNOR, Patrick D.T. Practical Reliability Engineering. New York : John Wiley & Sons, 1989. p 45.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$$

Figura 1. Función de confiabilidad WEIBULL



Fuente: O'CONNOR, Patrick

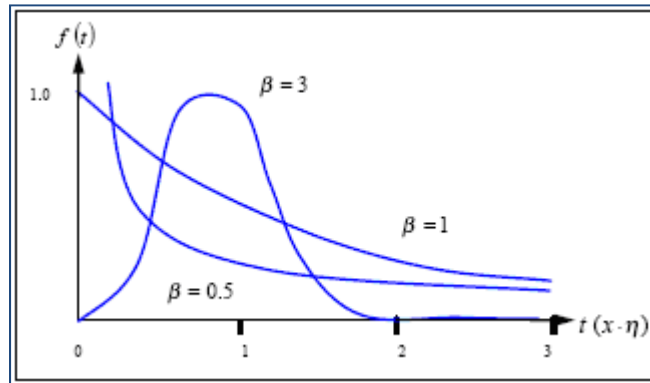
1.1.2 Función de densidad de probabilidad de falla. Esta función permite conocer la probabilidad de falla en un instante de tiempo  $t$ ; también se le conoce como curva *pdf* (*probabilidad de falla*). La siguiente es la ecuación de la función de densidad de probabilidad de fallas para la distribución Weibull y su gráfica<sup>4</sup> en la figura 2:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$$

---

<sup>4</sup> O'CONNOR, Patrick D.T. Practical Reliability Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1989. p 45.

Figura 2. Función de densidad de probabilidad de falla para la distribución WEIBULL



Fuente: O'CONNOR, Patrick

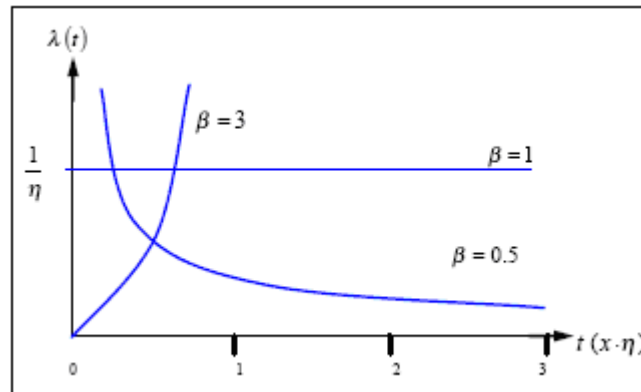
1.1.3 Función de tasa de falla. La tasa de fallas WEIBULL expresa la cantidad de averías o reparaciones por unidad de tiempo que pueden ocurrir durante el tiempo de observación o estudio de un elemento o equipo. A continuación la ecuación de tasa de fallas y su grafica.<sup>5</sup>

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

---

<sup>5</sup> O'CONNOR, Patrick D.T. Practical Reliability Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1989. p 45.

Figura 3. Función de tasa de fallas para la distribución Weibull



Fuente: O'CONNOR, Patrick

1.1.4 Parámetros de la distribución WEIBULL. Existen 2 parámetros de gran importancia para la ingeniería de mantenimiento y confiabilidad y que la distribución WEIBULL arroja valores bien definidos en comparación cuando se trabajan con valores puntuales. Estos son:

Vida útil o tiempo medio entre fallas *MTBF* y que se puede estimar a partir de:

$$\text{Esperanza (TBF)} = \text{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int (1 - F(t)) * dt, \text{ Donde MTBF Tiempo Medio}$$

entre Fallas,  $R(t)$  es la función de confiabilidad y  $F(t)$  es la función de no confiabilidad.

Tiempo medio de reparación *MTTR*<sup>6</sup> con  $M(t)$  como función de mantenibilidad.

---

<sup>6</sup> Reliasoft, Rio de Janeiro: RS401. p 286

$$MTTR = \eta * \text{Funcion Gamma}(1 + \frac{1}{\beta})$$

Tiempo medio para fallar  $MTTF^7$ , este valor se puede obtener con el modelamiento de datos como la vida promedio  $B(x)$  y a partir de :

$$MTTF = \gamma + \eta * \text{Funcion Gamma}(1 + \frac{1}{\beta})$$

Donde Gamma ( $\gamma$ ), Eta ( $\eta$ ) y beta son los obtenidos de la función de probabilidad de distribución WEIBULL.

Para los estudios de confiabilidad en la Ingeniería de mantenimiento suele hacerse cálculos puntuales en el tiempo para cuando no se cuentan con las distribuciones de probabilidad que modelen los datos de operación de un equipo; en general es más preciso cuando se trabaja con distribuciones que con cálculos puntuales. Software como el de WEIBULL ++ 7 de Reliasoft, permiten hacer modelamiento de datos con tiempos de operación hasta la falla y arrojan la distribución que más se acerca a los datos de entrada con todos sus parámetros; estos parámetros son uno solo para el MTBF, MTTR y MTTF.

---

<sup>7</sup> Reliasoft, Rio de Janeiro: RS401, p. 286

## 1.2 CONCEPTOS DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD

1.2.1 Concepto de confiabilidad. Se define como la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las que fue diseñado, durante el período de tiempo especificado y bajo las condiciones de operación dadas.<sup>8</sup>

La confiabilidad puede ser cuantificada de diferentes maneras utilizando conceptos probabilísticos, debido a que no se puede saber con certeza cuándo ocurrirán las fallas del equipo.<sup>9</sup>

La definición señala cuatro características específicas de la confiabilidad: probabilidad, desempeño satisfactorio, período de tiempo especificado y condiciones de operación dadas, estas se definen a continuación:

Probabilidad. Es la expresión que representa una fracción o un porcentaje que significa el número de veces que ocurre un evento, dividido por el número total de intentos.

Desempeño satisfactorio. Es el segundo elemento en la definición de confiabilidad, indica que criterios específicos deben ser establecidos para describir lo que es considerado como una operación satisfactoria. Una combinación de factores cualitativos y cuantitativos definen las funciones que el sistema debe lograr, usualmente presentados en el contexto como especificaciones de operación. El desempeño satisfactorio de un equipo implica conocer cuándo éste falla y cuando no se está desempeñando según los requerimientos.

---

<sup>8</sup> ROJAS, Jaime. Introducción a la Confiabilidad. Bogotá: Universidad de los Andes, 1975. p. 3.

<sup>9</sup> O'CONNOR, Patrick D.T. Practical Reliability Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1989. p. 45.

Período de tiempo. Debe ser debidamente identificado, por ejemplo el intervalo de tiempo puede estar basado en el calendario, en las horas de operación, en ciclos o kilómetros recorridos.

La confiabilidad debe ser medida basándose en pruebas o ensayos a través del tiempo y bajo condiciones de operación muy similares en las cuales el equipo va a funcionar en según los requerimientos del cliente o sistema.

Condiciones de operación dadas. Son en las que se espera que el equipo funcione, constituyen el cuarto elemento significativo de la definición básica de confiabilidad. Estas condiciones incluyen factores como ubicación geográfica donde se espera que el equipo esté operando, el medio ambiente, vibraciones mecánicas, transporte, almacenamiento, empaque, etc.

Los factores anteriores no sólo se analizan en el momento de operación del equipo dentro del sistema, sino también en condiciones en que el equipo está almacenado o está siendo transportado de un lugar a otro. En algunas ocasiones se da cuenta de que el empaque, el almacenamiento y el transporte son algunas veces más críticos para la confiabilidad, que las condiciones mismas durante su operación.<sup>10</sup>

La confiabilidad es una medida que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un elemento y ayuda en el momento de seleccionar un equipo entre varias opciones.

Los estudios de confiabilidad se realizan sistemática y rutinariamente en el diseño de equipos y sistemas, con la idea de mejorar la calidad de los procesos.

---

<sup>10</sup> BLANCHARD, Benjamin y otros. MAINTAINABILITY: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management. New York: John Wiley & Sons, 1995. p 14

La no confiabilidad provoca pérdidas de tiempo, altos costos de diferida, mayor número de repuestos y riesgos para la vida de las personas. Entre muchas de las causas de no confiabilidad se pueden resaltar las siguientes<sup>11</sup>:

La complejidad creciente de los equipos.

La automatización y complejidad de los procesos.

La complejidad de las organizaciones y de las comunicaciones internas

La dinámica del desarrollo tecnológico

Las restricciones presupuestarias

Los errores humanos

Las fallas aleatorias

La falta de programas de confiabilidad

La falta de programas adecuados de mantenimiento y reparación

1.2.2 Concepto de mantenibilidad. La falla de un sistema se define como un evento cuya realización provoca la pérdida de capacidad para realizar las funciones requeridas, o la pérdida de capacidad para satisfacer los requisitos especificados. Una falla causará la transición de un equipo de su estado satisfactorio a su estado insatisfactorio, conocido como estado de fallo, SoFa. Por lo tanto para satisfacer las necesidades de acuerdo con las especificaciones establecidas, todos los equipos pueden pertenecer a uno de los dos siguientes estados:

Estado de funcionamiento, SoFu (State of Functioning)

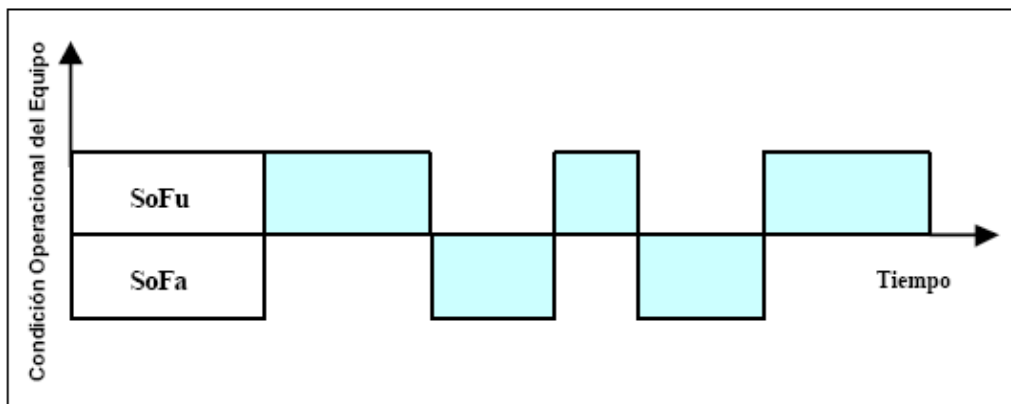
Estado de Falla, SoFa (State of Failure)

---

<sup>11</sup> ROJAS, Jaime. Introducción a la Confiabilidad. Bogotá: Universidad de los Andes, 1975. p 7.

Un equipo recuperable durante su vida operacional hasta el día de su falla fluctúa entre SoFu y SoFa. Los estados del equipo durante su proceso de uso se llama perfil de funcionalidad, normalmente se usa el tiempo de calendario como unidad de tiempo operativo en la representación del perfil<sup>12</sup> como se muestra.

Figura 4. Perfil de funcionalidad



Fuente: KNEZEVIC

La mantenibilidad de un equipo es la probabilidad de que un dispositivo sea devuelto a un estado en el que pueda cumplir su misión en un tiempo dado, luego de la aparición de una falla y cuando el mantenimiento es realizado en un determinado período de tiempo, al nivel deseado de confianza, con el personal especificado, las habilidades necesarias, el equipo indicado, los datos técnicos, manuales de operación y mantenimiento, el departamento de soporte de mantenimiento y bajo las condiciones ambientales especificadas<sup>13</sup>.

---

<sup>12</sup> KNEZEVIC, Jezdimir. Mantenibilidad. Madrid: Isdefe, 1996. p 21.

<sup>13</sup> KNEZEVIC, Jezdimir. Mantenibilidad. Madrid: Isdefe, 1996. p 47

La mantenibilidad puede expresarse en términos de factores de mantenimiento, tiempo empleado y costos. Más específicamente la mantenibilidad puede ser definida como:

Una característica inherente de un equipo o el diseño de un producto. Hace referencia a la facilidad, precisión, seguridad y economía en el desempeño de las acciones de mantenimiento. Un equipo podría ser diseñado de tal manera que pueda ser mantenido sin grandes inversiones de tiempo, al menor costo, con un mínimo impacto ambiental y con el mínimo gasto de recursos.

La habilidad de un equipo de ser mantenido, donde el mantenimiento constituye una serie de acciones necesarias para recuperar o conservar un equipo en el estado SoFu. Mantenibilidad es un parámetro de diseño y el mantenimiento es requerido como una consecuencia del diseño.

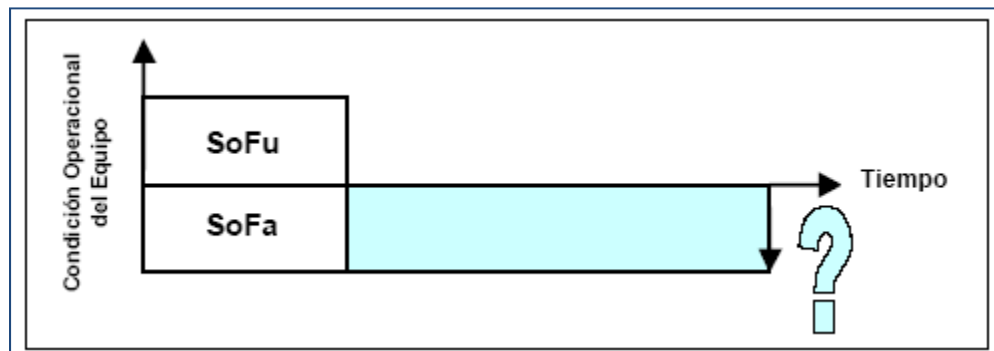
Una característica de diseño e instalación la cual es expresada como la probabilidad de que un equipo sea recuperado o conservado en las condiciones especificadas, en un período de tiempo dado, cuando el mantenimiento es realizado acorde con los procedimientos y recursos preestablecidos.

Una característica de diseño e instalación la cual es expresada como la probabilidad que el mantenimiento no requerirá más tiempo del período dado, cuando el equipo es operado acorde con los procedimientos prescritos por el personal con las habilidades adecuadas.

Una característica de diseño e instalación la cual es expresada como la probabilidad que el costo de mantenimiento para un equipo no excederá la cantidad de dinero especificada en un período de tiempo, cuando el equipo es operado y mantenido acorde con los procedimientos prescritos.

La mantenibilidad es una característica que depende del diseño, históricamente se han ignorado los aspectos de la recuperación de los equipos porque los diseñadores se preocupan más por la funcionalidad de éstos. ¿Cuánto durará la tarea de reparación?, es una pregunta que está directamente relacionada con la parte inferior del perfil de funcionalidad como se muestra a continuación<sup>14</sup> :

Figura 5. Duración incierta del tiempo de recuperación



Fuente: KNEZEVIC, Jezdimir

La ingeniería de mantenibilidad se crea cuando los diseñadores y fabricantes comprenden la carencia de medidas técnicas y disciplinas científicas en el mantenimiento. Por esto es una disciplina científica que estudia la complejidad, los factores y los recursos relacionados con las actividades que debe realizar el usuario para mantener la mantenibilidad de un producto y que elabora métodos para su cuantificación, evaluación y mejora.

La reducción de los costos de mantenimiento durante su uso también son influenciados por la mantenibilidad, proporciona una herramienta a los ingenieros para la descripción cuantitativa de la capacidad inherente de su producto de ser recuperado para el servicio, mediante la realización y tareas del mantenimiento.

<sup>14</sup> KNEZEVIC, Jezdimir. Mantenibilidad. Madrid: Isdefe, 1996. p 47

1.2.3 Concepto de disponibilidad. Se define como la probabilidad de que el equipo esté operando satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables, donde el tiempo total considerado incluye el tiempo de operación, tiempo activo de reparación, tiempo inactivo, tiempo en mantenimiento preventivo (en algunos casos), tiempo administrativo y tiempo logístico<sup>15</sup>.

La disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un equipo. La mayoría de los usuarios aseguran que necesitan la disponibilidad de un equipo tanto como la seguridad. Hay varias opciones para lograrlo, una es construir un equipo que cuando falle sea fácil de recuperar, y la segunda es construir los equipos confiables, y por lo tanto, altamente costosos que a nadie le sería atractivo.

También es una medida importante y útil en casos en que el usuario debe tomar decisiones para elegir un equipo entre varias alternativas. Para tomar una decisión con respecto a la adquisición del nuevo equipo, es necesario utilizar información que abarque todas las características relacionadas, entre ellas la disponibilidad, que es una medida que suministra una imagen más completa sobre el perfil de funcionalidad.

La modelación de la disponibilidad se puede realizar mediante diversas técnicas, desde unas muy simples que se basan en indicadores puntuales e instantáneos que se calculan independiente de la estimación de probabilidades y de sus leyes que modelan la confiabilidad y la mantenibilidad, hasta otras más complejas donde si se tienen en cuenta las distribuciones que simulan el comportamiento de la

---

<sup>15</sup> RAMAKUMAR, R. Engineering Reliability: Fundamentals and Applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993. p 8

confiabilidad y de la mantenibilidad. A continuación se describen algunas opciones de disponibilidad:

Disponibilidad Genérica  $A_G$ . Es muy útil cuando se tienen los tiempos totales de funcionamiento y de no disponibilidad, en este caso no se poseen los tiempos exactos de demoras logísticas, suministros, retrasos, otros.

$$A_G = \frac{MUT}{MUT + MDT} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

El MUT es el tiempo en que el equipo funciona correctamente, como a su vez el MDT es el tiempo de no disponibilidad del equipo por cualquier origen, los tiempos de paradas previstas o planeadas por mantenimiento deben descontarse del tiempo en que el equipo puede operar; de tal manera que el MTBF se denomina tiempo entre fallas y el MTTR es el tiempo medio para reparar.

Disponibilidad Inherente  $A_i$ . Es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente, cuando sea requerido en cualquier tiempo bajo las condiciones de operación especificadas y en un entorno ideal de soporte logístico, es decir, con la disponibilidad adecuada de personal, repuestos, herramientas, equipos de prueba y demás, sin considerar ninguna demora logística o administrativa. El MTTR es el tiempo activo neto de reparación sin ninguna demora y con todos los recursos disponibles al iniciarse la reparación. No contempla los mantenimientos planeados (preventivos o predictivos). La disponibilidad inherente está basada únicamente en la distribución de fallas y la distribución de tiempo de reparación.

$$A_I = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Disponibilidad Alcanzada  $A_A$ . Es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente, cuando sea requerido en cualquier tiempo bajo las condiciones de operación especificadas y en un entorno ideal de soporte logístico, sin considerar ningún retraso logístico o administrativo pero involucrando en sus cálculos los tiempos imputables a las actividades planeadas de mantenimiento.

$$A_A = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{MTBM_C} + \frac{1}{MTBM_P}}}{\frac{1}{\frac{1}{MTBM_C} + \frac{1}{MTBM_P}} + \frac{1}{\frac{MTTR}{MTBM_C} + \frac{M_P}{MTBM_P}}}$$

Donde  $\bar{M}$  es el tiempo medio de mantenimiento activo requerido para realizar cualquier tarea de mantenimiento.

Disponibilidad Operacional  $A_O$ . Es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente, cuando se requiere que funcione bien en cualquier tiempo bajo las condiciones de operación especificadas en un entorno real de soportes logísticos, abarcando por lo tanto dentro de los tiempos de mantenimiento, los tiempos causados por los retrasos logísticos y administrativos, es decir, todos los tiempos concernientes al estado de reparación, incluyendo el mantenimiento programado y no programado.

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}}$$

Donde  $\overline{M}'$  se calcula igual que  $\overline{M}$  solo que al momento de calcular el MTTR no solo se toman los correspondientes TTR, sino que se le suman respectivamente sus tiempos logísticos de demora (LDT) pertinentes a cada una de las reparaciones.

Disponibilidad Operacional Generalizada  $A_{GO}$ . Es útil para explicar los lapsos de tiempo en que los equipos están disponibles y no producen.

$$A_{GO} = \frac{MTBM'}{MTBM' + \overline{M}'}$$

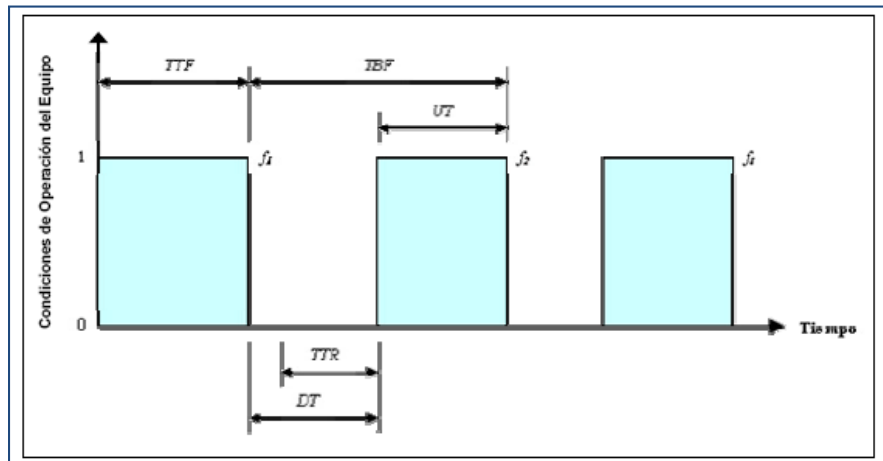
Donde  $MTBM'$  se calcula igual que  $MTBM$  del caso anterior de disponibilidad, solo que los Ready Time se les suman a los tiempos útiles que los anteceden o siguen (el que este más cercano), de tal forma que los tiempos útiles correspondientes aumentan en el valor del tiempo de alistamiento (Ready Time) y por ende aumenta también el  $MTBM_C$  o  $MTBM_P$  en cada caso, tanto en reparaciones (correctivos) como en las tareas proactivas (mantenimientos planeados), con lo cual aumenta entonces el  $MTBM_C$  y el  $MTBM_P$ .

1.2.4 Relación entre confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD). La relación entre estas tres variables se puede mostrar cómo<sup>16</sup>:

---

<sup>16</sup> DIAZ MATALOBOS, Ángel. Confiabilidad en mantenimiento. Caracas: IESA, 1992. p 8

Figura 6. Relación entre confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad



Fuente: DIAZ

Donde:

1 = Condición operacional del equipo.

0 = Condición no operacional del equipo.

$F_i$  = Falla  $i$ -ésima.

TTF = Time to Fail, tiempo hasta fallar (usado en equipos no reparables, que sólo fallan una vez).

TBF = Time between failures o tiempo entre fallas.

UT = Up time o tiempo operativo entre fallas.

DT = Down time o tiempo no operativo entre fallas.

TTR = Time to repair o tiempo necesario para reparar.

De aquí se derivan los siguientes parámetros para un número de fallas =  $m$ .

$$MTBF = \text{Mean time between failures, tiempo medio entre fallas} = \frac{\sum TBF}{m}$$

MUT = Mean up time, tiempo medio de funcionamiento entre fallas =  $\frac{\sum UT}{m}$

MDT = Mean Down time, tiempo medio de indisponibilidad entre fallas =  $\frac{\sum DT}{m}$

MTTR = Mean time to repair, tiempo medio de reparación =  $\frac{\sum TTR}{m}$

Si se considera a t lo suficientemente grande, la relación matemática entre CMD se puede expresar de la siguiente manera:

$$DISPONIBILIDAD = \frac{\sum UT}{\sum UT + \sum DT} = \frac{MUT}{MUT + MDT}$$

La expresión anterior muestra que la disponibilidad es una función de la confiabilidad y la mantenibilidad. Si se asume que MTTR tiende a MDT y MTBF es mucho mayor que MTTR, la fórmula anterior se puede aproximar a:

$$DISPONIBILIDAD = \frac{MTBF}{MTBF + MTR}$$

## 2. DESCRIPCION DE LA PLANTA EN ESTUDIO

### 2.1 DESCRIPCION DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS

El campo La Cira-Infantas está ubicado en la parte central de la antigua Concesión de Mares, al oriente del río Magdalena y al sur del río Sogamoso, abarcando un área de 160 kilómetros cuadrados y a 22 kilómetros de Barrancabermeja. Son los campos de mayor producción a lo largo de la historia en la cuenca del valle medio del Magdalena.

El campo la Cira-Infantas cuenta con más de 1.703 pozos, de los cuales 794 son productores, 239 son inyectores de agua y 603 inactivos. La producción promedio de aceite es hoy de cerca de 26000 barriles por día. El pozo descubridor del campo fue el Infantas 2, terminado en abril de 1918. Inicialmente, la mayor parte de los pozos produjeron por flujo natural; luego se pasó a un sistema de levantamiento por gas, el cual fue desmontado en 1935 para dar paso al sistema actual de bombeo mecánico. La máxima producción se alcanzó en 1927, con una tasa de 37.900 barriles por día. La perforación del anticlinal de la Cira comenzó en febrero de 1925, con el pozo LC-58. En este mismo año se descubre la zona B y las arenas 116 de la zona A, mediante la perforación del pozo LC-116. Con la perforación y la terminación del pozo LC-125 se descubre la zona C.

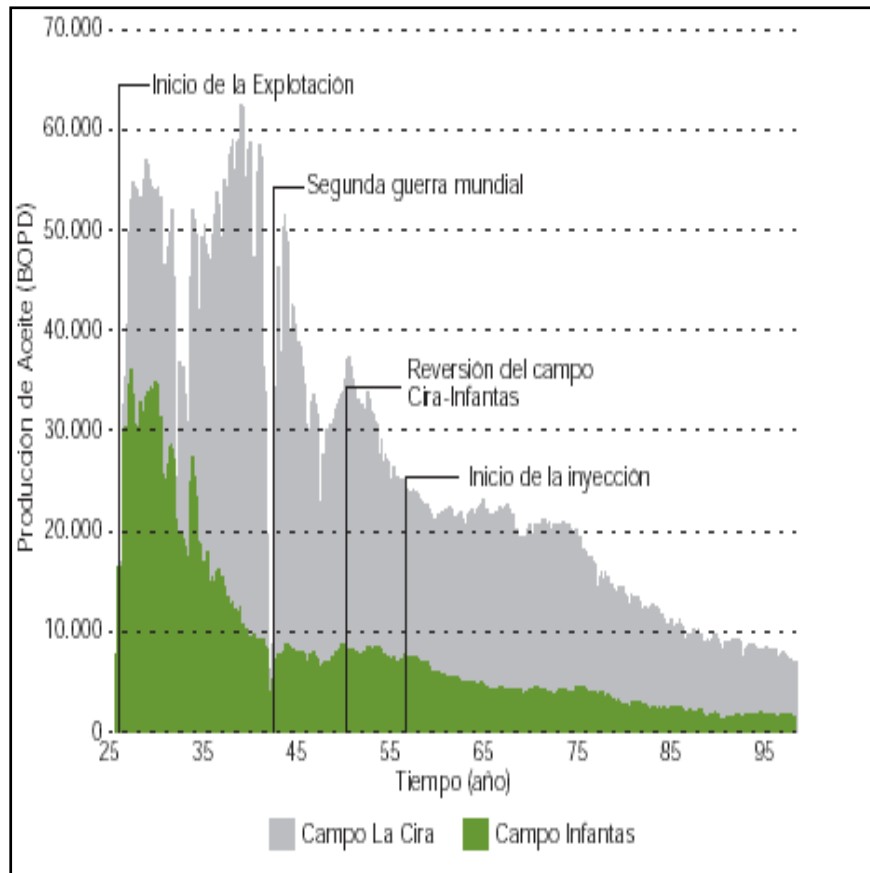
A finales de 1940 se había perforado un total de 675 pozos. Luego de algunos proyectos de inyección de gas en los años 30, se emprende el primer programa de inyección de agua en el campo la Cira entre 1946 y 1949.

En 1957 se inició la ejecución de recobro de aceite por inyección de agua en la zona C del campo la Cira, en un área de 280 acres.

Entre 1964 y 1966, Ecopetrol perforó 19 pozos que permitieron el desarrollo del área la Cira norte, considerando el pozo LC-1753 como el descubridor del área.

En los años 70, Ecopetrol realizó otros programas de inyección. La producción máxima del campo se obtuvo en 1939, con 53 mil barriles por día. El pico de producción secundaria se alcanzó en octubre de 1974, con una tasa de 11.780 barriles por día.

Figura 7. Grafica de producción del campo la Cira Infantas



Fuente: Ecopetrol S.A

### 2.1.1 Descripción del proceso de inyección de agua

Para la inyección de agua como parte del proceso de recuperación secundaria, Ecopetrol cuenta con un punto de captación y bombeo de agua llamado campo 50. Este, está ubicado en las inmediaciones del río Yarima y a partir de este punto se bombea agua hasta un sitio conocido como campo 23 en el cual se realiza el tratamiento del agua en agua potable y agua industrial.

Estos dos productos son bombeados para los diferentes usuarios como: oficinas, casino, campamentos, barrios entre otros, para lo que es el agua potable. El agua industrial es la utilizada en el proceso de inyección. Este producto se bombea desde campo 23 hasta un sitio conocido como cerro Borrero, en el cual existen los tanques de recibo y almacenamiento y de este punto llegan por gravedad hasta la succión de las Turbobombas en la planta de inyección 5.

En este punto del proceso se inicia lo que se conoce como recuperación secundaria del campo, pues el proceso consiste en inyectar grandes volúmenes de agua por medio de pozos inyectoros, para extraer crudo en otros pozos del mismo yacimiento o formación los cuales están comunicados por las diferentes arenas. El pozo productor tendrán una mayor presión de fondo debido a la presión transmitida por la columna de agua y de esta manera el volumen extraído por medio de levantamiento artificial\* será mayor.

A continuación una vista de los equipos de inyección en la planta 5:

---

\* Levantamiento artificial realizado con bombeo mecánico y bombas de cavidad progresiva PCP

Figura 8. Vista panorámica Turbobombas PIA 5 campo la Cira Infantas



Fuente: Ecopetrol S.A

### 3. DIAGNOSTICO DE LA DISPONIBILIDAD DE INYECCION DE LA PIA 5

A continuación se hará un recorrido por el estado de disponibilidad de los equipos de inyección de la planta en estudio, con el fin de identificar los malos actores del conjunto y evaluar la disponibilidad contra los requerimientos de operación. Como herramienta de simulación se hará uso del software WEIBULL ++7 por ser la herramienta corporativa de Ecopetrol S.A para sus estudios de confiabilidad y por estar disponible para este trabajo de monografía.

#### 3.1 PREPARACION DE LA INFORMACION

La información que se usa para alimentar el software WEIBULL ++ 7 y el respectivo análisis de confiabilidad, fue proporcionada por la base de datos en Excel (Confipetrol S.A y Ecopetrol S.A), e información del CMMS ELLIPSE aplicado en Ecopetrol S.A. El estadístico a utilizar, para el modelamiento de los datos será la distribución de WEIBULL con 3 parámetros, por ser el recomendado para la evaluación de confiabilidad en equipos sometidos a una prolongada vida de operación y desgaste.

Los datos están como tiempos de operación hasta la falla y llamados por sus modos de falla, número de salidas, tiempo de salidas planeadas y no planeadas del sistema en estudio, que para este trabajo son las Turbobombas de la PIA 5.

El tiempo de estudio es la información analizada de 24 meses que comprenden (Enero del 2008 a Diciembre del 2009). La información de entrevistas informales con personal técnico de mantenimiento y de operaciones, resolvieron muchas de las inquietudes y criterios de decisión para sugerir recomendaciones

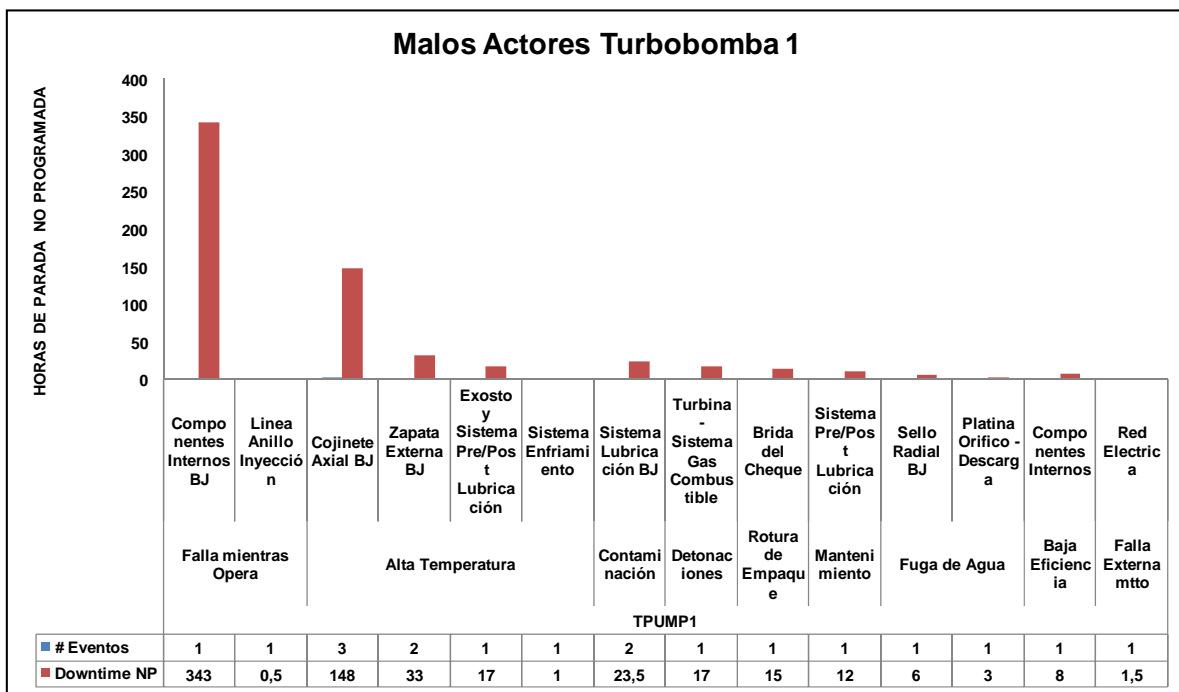
Los criterios que se tuvieron en cuenta para clasificar las fallas fueron:

Tiempo de operación hasta la falla  
 Los tipos de falla más comunes  
 Los de mayor impacto en la producción

De esta manera se obtuvieron los registros iniciales para realizar los cálculos y simulaciones en el software WEIBULL ++ 7. Ver anexo A

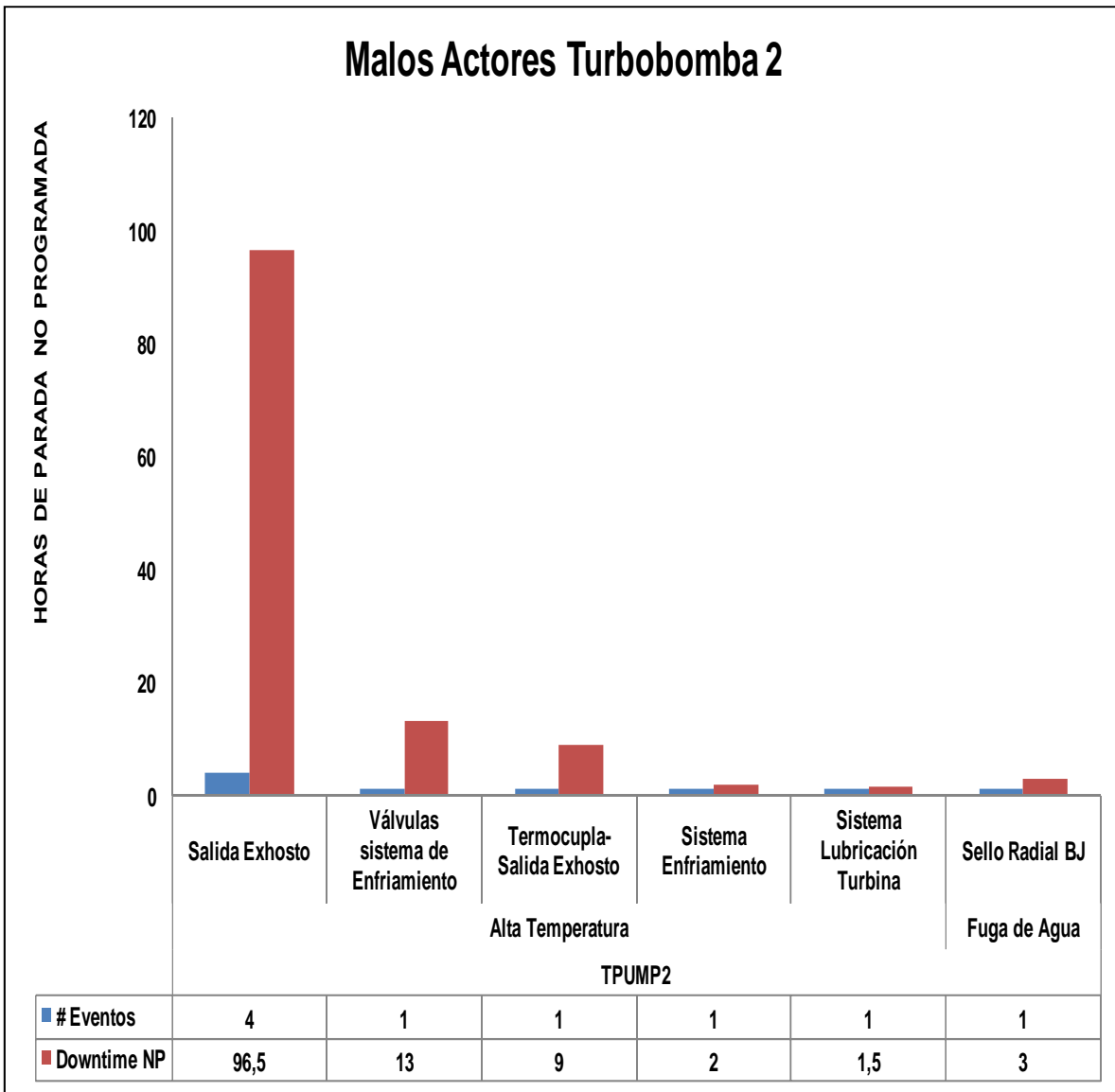
A continuación se presentan los malos actores asociados a los modos de falla más predominantes de las Turbobombas:

Figura 9. Malos actores Turbobomba 1 PIA5



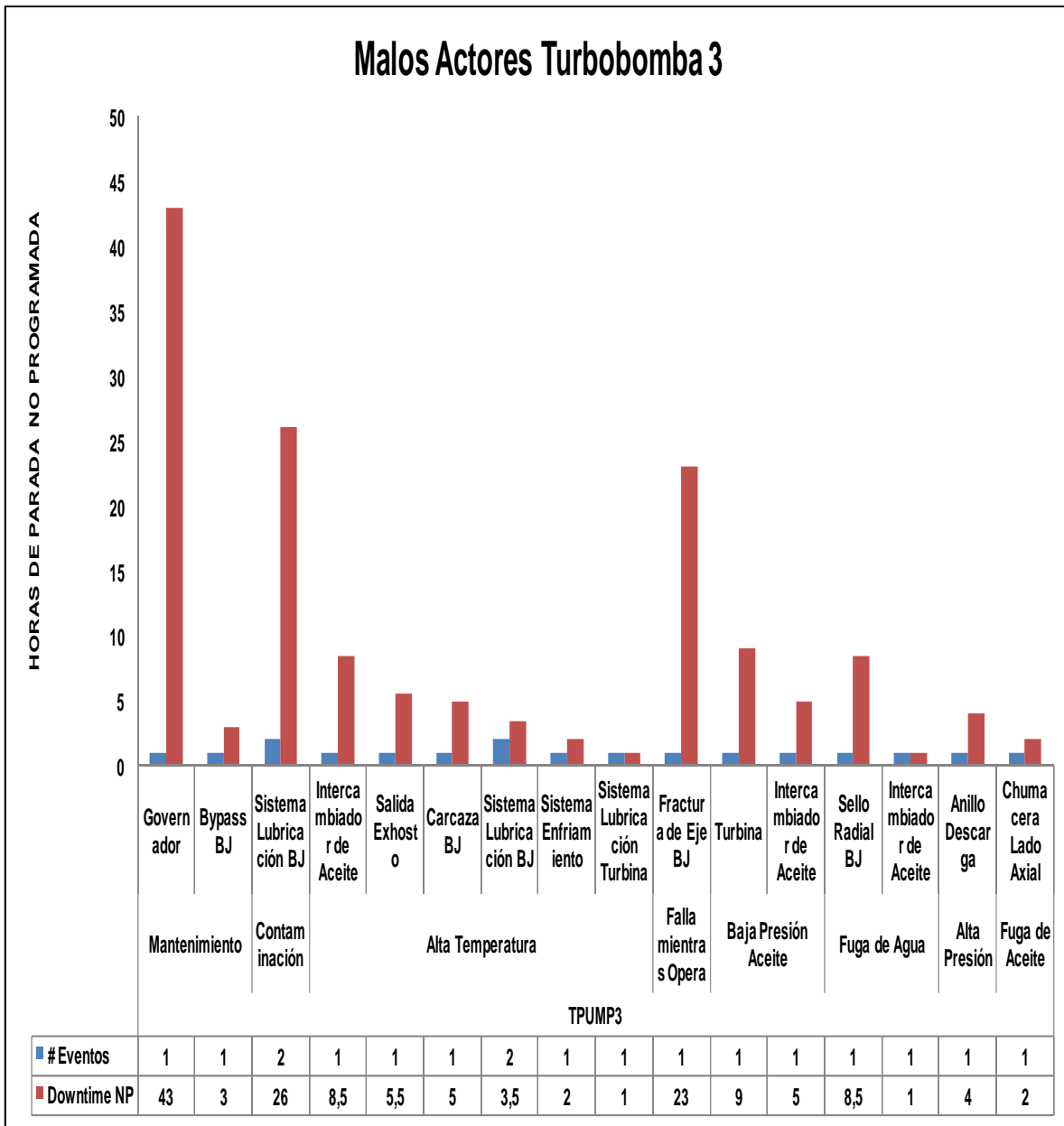
Fuente: Base de datos mantenimiento Ecopetrol S.A

Figura 10. Malos actores Turbobomba 2 PIA5



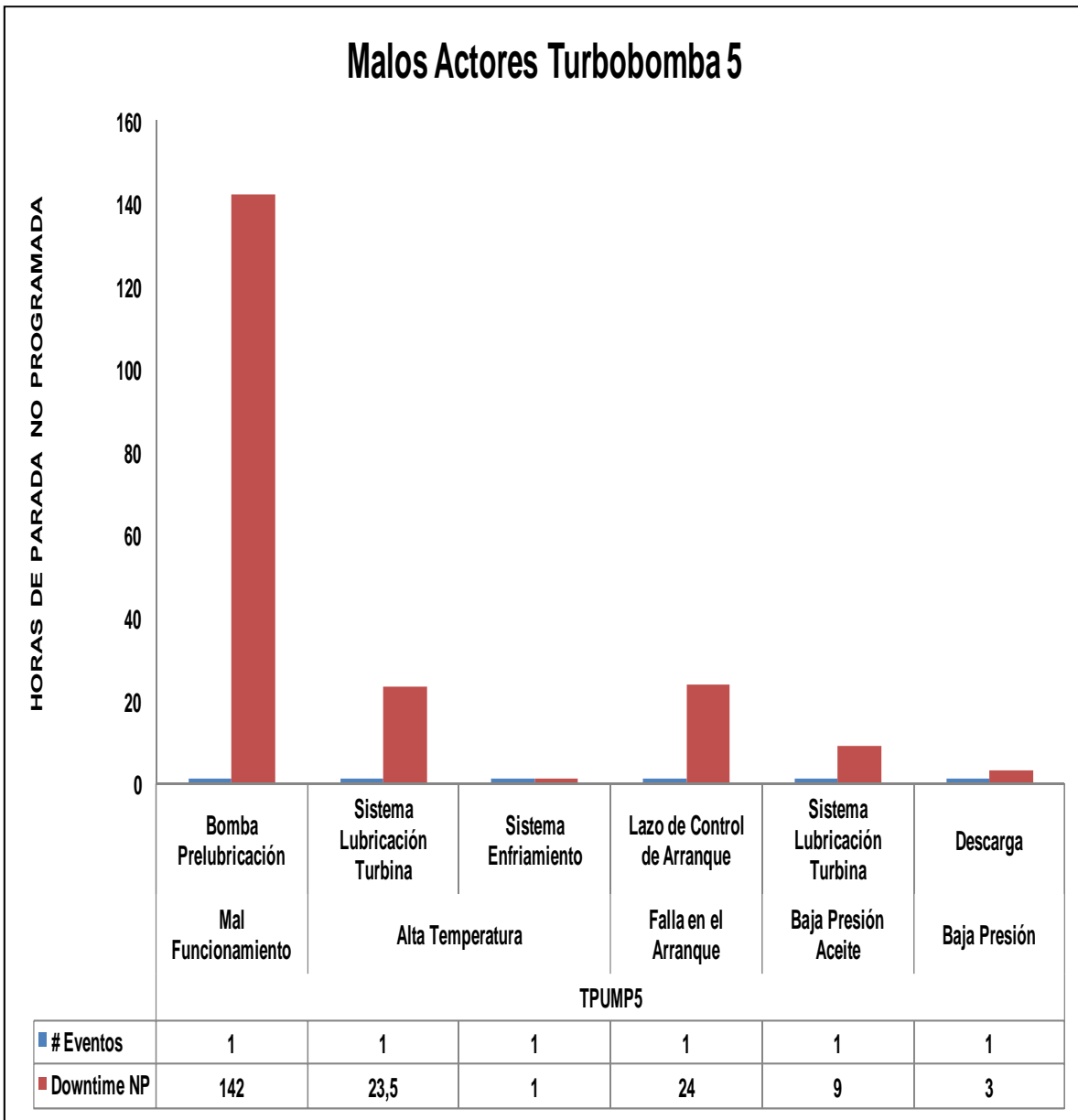
Fuente: Base de datos mantenimiento Ecopetrol S.A

Figura 11. Malos actores Turbobomba 3 PIA5



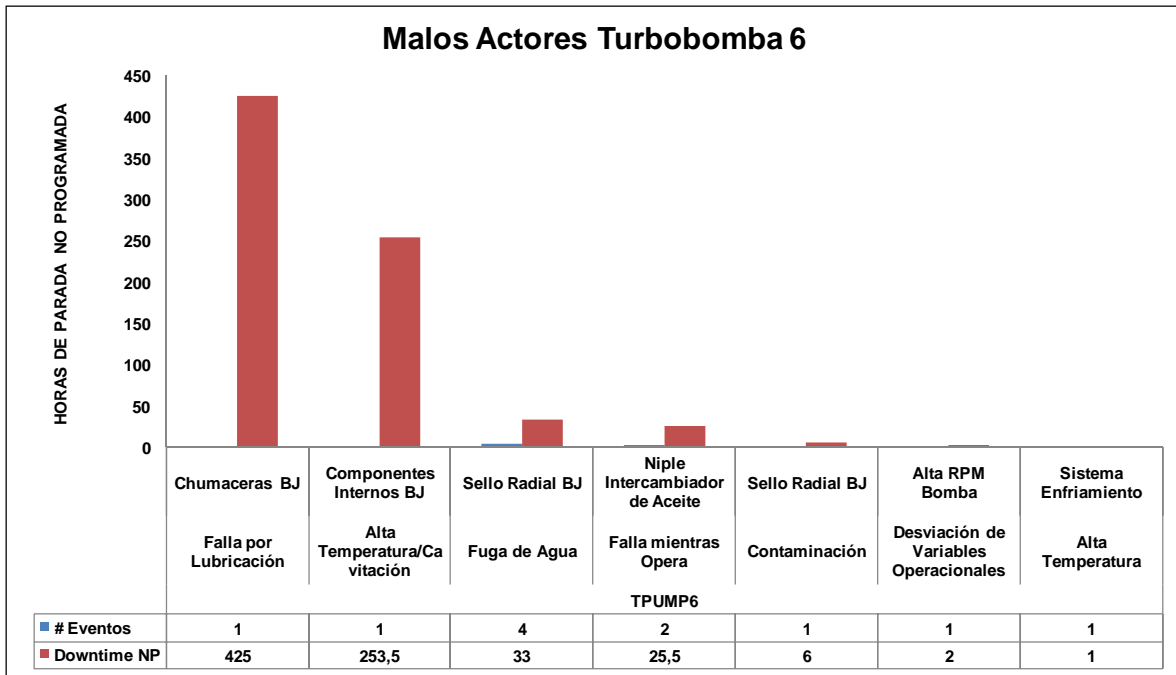
Fuente: Base de datos mantenimiento Ecopetrol S.A

Figura 12. Malos actores Turbobomba 5 PIA5



Fuente: Base de datos mantenimiento Ecopetrol S.A

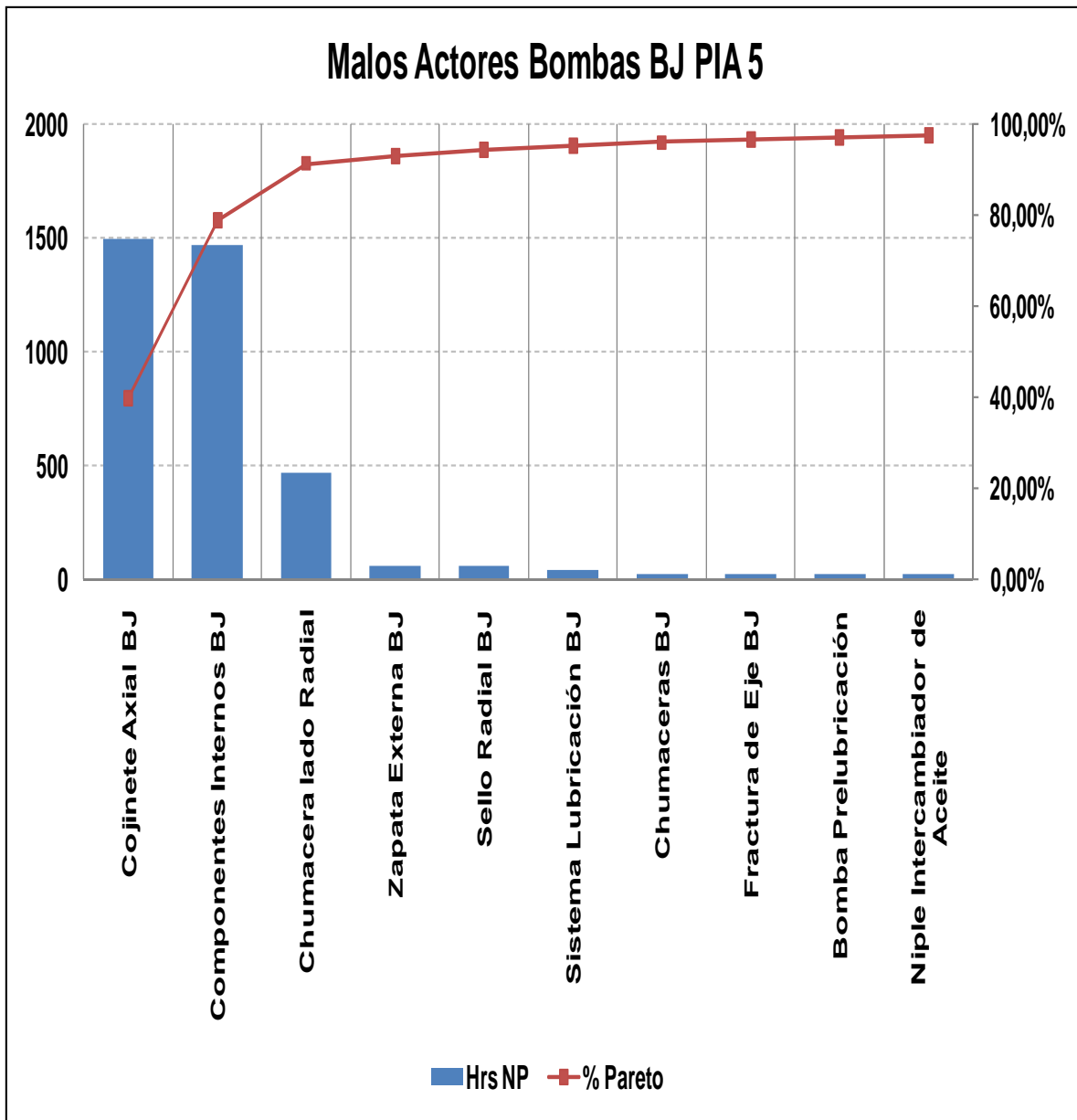
Figura 13. Malos actores Turbobomba 6 PIA5



Fuente: Base de datos mantenimiento Ecopetrol S.A

Analizando los datos de tiempo de operación hasta la falla y los modos de falla, se separaron las fallas entre las ocasionadas por eventos en componentes de bombas BJ o en componentes de turbinas; De esta manera se identificaron los malos actores que aporta cada componente a las salidas del conjunto Turbobomba.

Figura 14. Malos actores Bombas BJ PIA5



Fuente: Base de datos mantenimiento Ecopetrol S.A

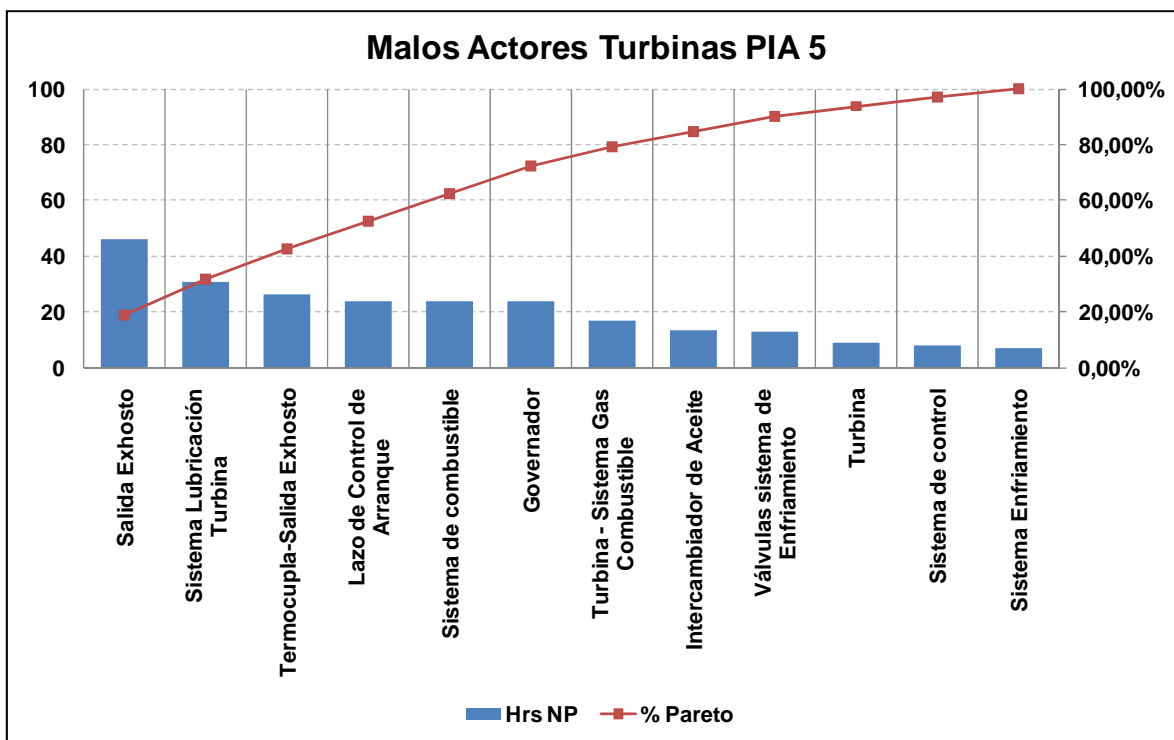
A continuación una vista del tipo de bomba usada para la inyección de agua en la PIA5.

Figura 15. Bomba centrífuga Bayron Jackson PIA5



Fuente: Ecopetrol S.A

Figura 16. Malos actores Turbinas PIA5

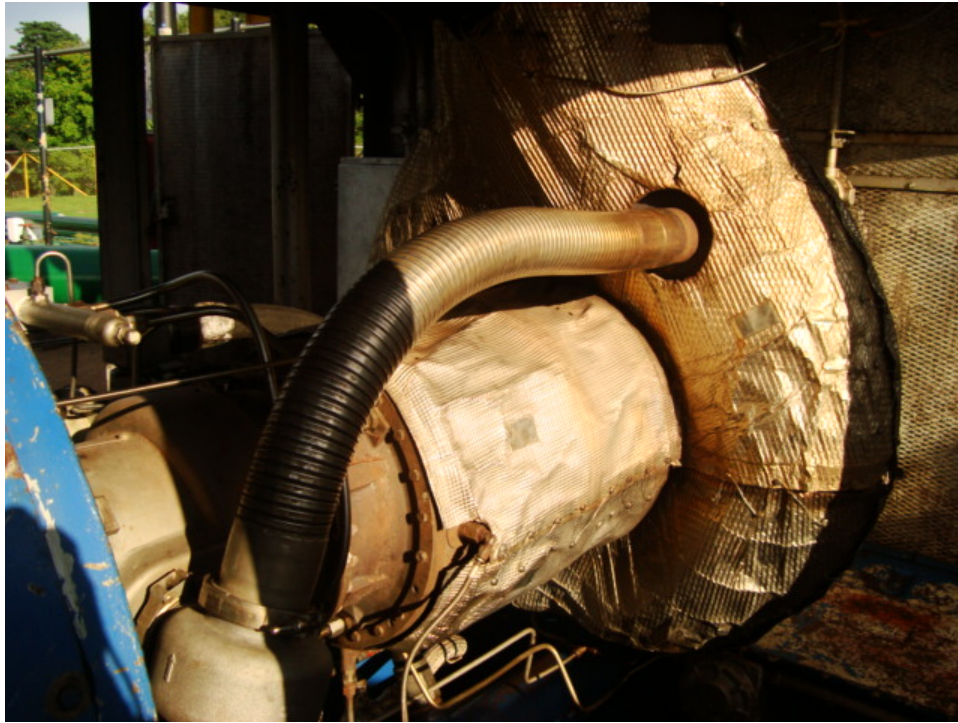


Fuente: Base de datos mantenimiento Ecopetrol S.A

Los anteriores malos actores permitirán contrastar los datos que arroje la simulación en WEIBULL ++7, ya que de esta manera se ha identificado los componentes o ítems mantenibles que mas provocan perdida de la función del conjunto Turbobomba y afectan en gran consideración la disponibilidad de la planta de inyección PIA 5.

A continuación una vista del tipo de turbina usada para el movimiento de las bombas de inyección de agua en la PIA5.

Figura 17. Turbina Solar PIA5



Fuente: Ecopetrol S.A

### 3.2 DIAGNOSTICO SEGÚN ANALISIS DE DATOS EN WEIBULL ++ 7

El diagnostico general de las Turbobombas es a continuación el siguiente:

- Diagnostico de la Turbobomba 1.

Descripción del equipo:

Turbina: SOLAR

Velocidad turbina productora de gas: 22355 RPM

Velocidad turbina de potencia: 20923 RPM

Presión cámara de combustión: 57 psi

Presión de aceite: 54 psi

Temperatura tanque de aceite: 169 °F

Temperatura de aceite: 151 °F

Temperatura gases de salida: 814°F

Bomba: BAYRON JACKSON

Velocidad: 5675 RPM

Temperatura de carcasa: 98°F

Temperatura cojinete axial: 127 °F

Temperatura cojinete Radial: 111 °F

Presión de succión: 45 psi

Presión de descarga: 1645 psi

Flujo: 12500 BOPD

El diagnostico de confiabilidad realizado con el software WEIBULL ++ 7 para la Turbobomba 1 de la planta de inyección 5 es:

$\beta = 0,6504$  (mortalidad infantil)

$\eta = 257,4620$  (vida característica)

$\gamma = 5,9600$  (vida mínima, después de  $t=5,9600$  horas empezaran a ocurrir las fallas)

MTTF= 357,4607 horas

Los valores arrojados en la simulación están asociados a fallas por deterioro temprano o falla infantil  $\beta < 1$ , y se puede evidenciar con el valor tan pequeño del tiempo promedio para fallar, que solo alcanza a tener un ciclo de operación normal de 15 días como lo señala el dato calculado de 357,4607 horas.

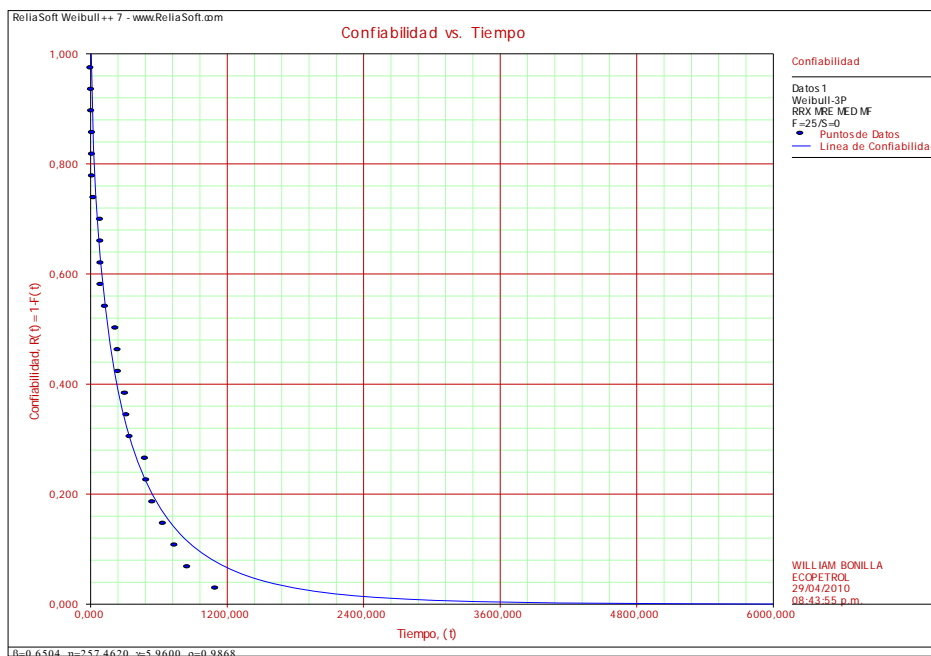
Si estas fallas caen dentro del intervalo de falla, podría tener las siguientes características:

- Errores humanos / Errores de mantenimiento
- Mantenimientos no asegurados por partes reemplazadas con un ciclo de vida no efectivo o partes sub estándares por falta de disponibilidad de repuestos originales (equipo obsoleto)
- Inadecuada carga de trabajo

Tabla 3. Diagnostico de confiabilidad Turbobomba 1

PERIODO DE TIEMPO (DIAS/HORAS)		CONFIABILIDAD
180	4320	0,19%
90	2160	1,87%
45	1080	7,95%
22	528	20,52%
8	192	44,51%
1	24	83,74%

Figura 18. Confiabilidad Turbobomba 1



Fuente: modelamiento software WEIBULL ++ 7

La confiabilidad modelada se muestra en la figura 18.

Los modos de falla dominantes están identificados a los malos actores mostrados...en la figura 9... Turbobomba 1 (componentes internos BJ y cojinetes turbina).

➤ Diagnostico de la Turbobomba 2.

Descripción del equipo:

Turbina: SOLAR

Velocidad turbina productora de gas: 22355 RPM

Velocidad turbina de potencia: 20923 RPM

Presión cámara de combustión: 57 psi

Presión de aceite: 54 psi

Temperatura tanque de aceite: 169 °F

Temperatura de aceite: 151 °F

Temperatura gases de salida: 814°F

Bomba: BAYRON JACKSON

Velocidad: 5675 RPM

Temperatura de carcasa: 98°F

Temperatura cojinete axial: 127 °F

Temperatura cojinete Radial: 111 °F

Presión de succión: 45 psi

Presión de descarga: 1645 psi

Flujo: 12500 BOPD

El diagnostico de confiabilidad realizado con el software WEIBULL ++ 7 para la Turbobomba 2 de la planta de inyección 5 es:

$\beta = 1,2634$ (mortalidad por desgaste temprano)

$\eta = 551,3611$ (vida característica)

$\gamma = -60,05$  (tan pronto se inicie la operación del equipo, se tienen probabilidades de fallas; fallas tempranas)

MTTF= 452,2457horas

Como se puede ver en los parámetros  $\beta > 1$ , las fallas están ligadas a deterioros por desgastes tempranos. El dato calculado de 452,2457 horas indica una operación normal de 19 días.

Las fallas para este intervalo podrían tener las siguientes características:

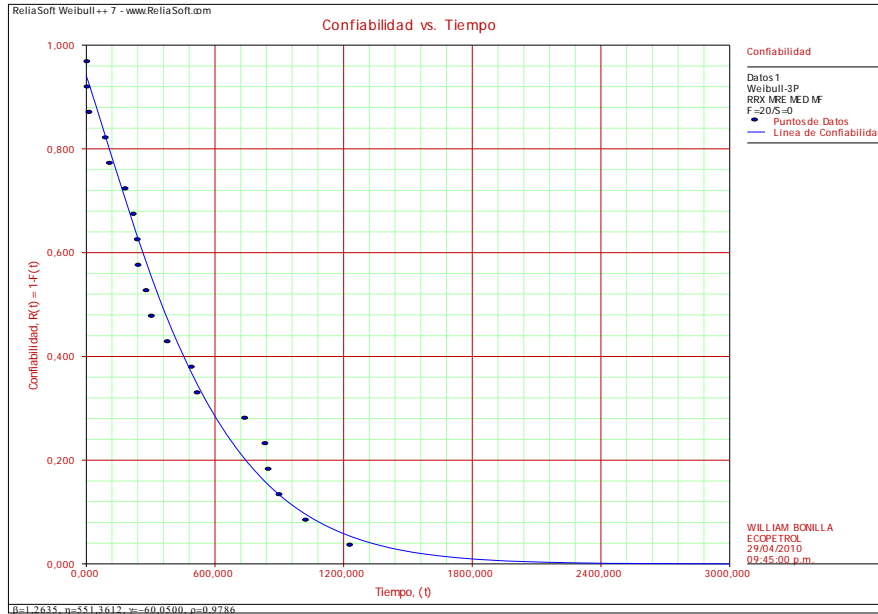
- Bajo ciclo de disponibilidad
- Fallas por componentes mecánicos móviles
- Vibración y desbalance de componentes

- Condiciones de operación afectadas por otros procesos ligados a la inyección de agua
- Mantenimientos no asegurados por partes reemplazadas con un ciclo de vida no efectivo o partes sub estándares por falta de disponibilidad de repuestos originales (equipo obsoleto)

Tabla 4. Diagnostico de confiabilidad Turbobomba 2

PERIODO DE TIEMPO (DIAS/HORAS)		CONFIABILIDAD
180	4320	0,0001%
90	2160	0,3%
45	1080	8,18%
22	528	33,80%
8	192	68,94%
1	24	91,13%

Figura 19. Confiabilidad Turbobomba 2



Fuente: modelamiento software WEIBULL ++ 7

La confiabilidad modelada se muestra en la figura 19.

Los modos de falla dominantes están identificados a los malos actores mostrados...en la figura 10... Turbobomba 2 (problemas en exhosto y válvulas en sistemas de enfriamiento, alta temperatura).

➤ Diagnostico de la Turbobomba 3.

Descripción del equipo:

Turbina: SOLAR

Velocidad turbina productora de gas: 22355 RPM

Velocidad turbina de potencia: 20923 RPM

Presión cámara de combustión: 57 psi

Presión de aceite: 54 psi

Temperatura tanque de aceite: 169 °F

Temperatura de aceite: 151 °F

Temperatura gases de salida: 814°F

Bomba: BAYRON JACKSON

Velocidad: 5675 RPM

Temperatura de carcasa: 98°F

Temperatura cojinete axial: 127 °F

Temperatura cojinete Radial: 111 °F

Presión de succión: 45 psi

Presión de descarga: 1645 psi

Flujo: 12500 BOPD

El diagnostico de confiabilidad realizado con el software WEIBULL ++ 7 para la Turbobomba 3 de la planta de inyección 5 es:

$\beta = 0,5889$  (mortalidad infantil)

$\eta = 346,0063$  (vida característica)

$\gamma = -1,1025$  (tan pronto se inicie la operación del equipo, se tienen probabilidades de fallas; fallas tempranas)

MTTF = 532,5058 horas

Los valores arrojados en la simulación están asociados a fallas por deterioro temprano y se puede evidenciar con el valor tan pequeño del tiempo promedio para fallar, que solo alcanza a tener un ciclo de operación normal de 22 días como lo señala el dato calculado de 532,5058 horas.

Si estas fallas caen dentro del intervalo de falla, podría tener las siguientes características:

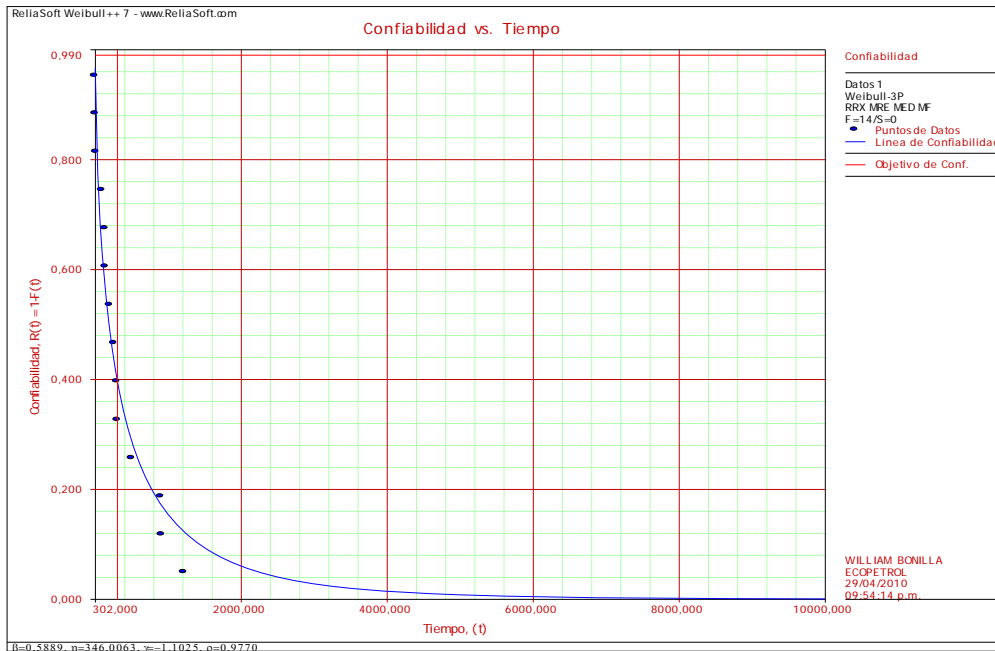
- Errores humanos / Errores de mantenimiento

- Mantenimientos no asegurados por partes reemplazadas con un ciclo de vida no efectivo o partes sub estándares por falta de disponibilidad de repuestos originales (equipo obsoleto)
- Inadecuada carga de trabajo

Tabla 5. Diagnostico de confiabilidad Turbobomba 3

PERIODO DE TIEMPO (DIAS/HORAS)		CONFIABILIDAD
180	4320	1,20%
90	2160	5,28%
45	1080	14,14%
22	528	27,69%
8	192	49,20%
1	24	80,79%

Figura 20. Confiabilidad Turbobomba 3



Fuente: modelamiento software WEIBULL ++ 7

➤ Diagnostico de la Turbobomba 5

Descripción del equipo:

Turbina: SOLAR

Velocidad turbina productora de gas: 22355 RPM

Velocidad turbina de potencia: 20923 RPM

Presión cámara de combustión: 57 psi

Presión de aceite: 54 psi

Temperatura tanque de aceite: 169 °F

Temperatura de aceite: 151 °F

Temperatura gases de salida: 814°F

Bomba: BAYRON JACKSON

Velocidad: 5675 RPM

Temperatura de carcasa: 98°F

Temperatura cojinete axial: 127 °F

Temperatura cojinete Radial: 111 °F

Presión de succión: 45 psi

Presión de descarga: 1645 psi

Flujo: 12500 BOPD

El diagnostico de confiabilidad realizado con el software WEIBULL ++ 7 para la Turbobomba 5 de la planta de inyección 5 es:

$\beta = 0,6193$  (mortalidad infantil)

$\eta = 173,8405$  (vida característica)

$\gamma = 2,9325$  (vida mínima, después de  $t = 2,9325$  horas aparecen las probabilidades de fallas)

MTTF = 254,2139 horas

Los valores arrojados en la simulación están asociados a fallas por deterioro temprano y se puede evidenciar con el valor tan pequeño del tiempo promedio para fallar, que solo alcanza a tener un ciclo de operación normal de 11 días como lo señala el dato calculado de 254,2139 horas.

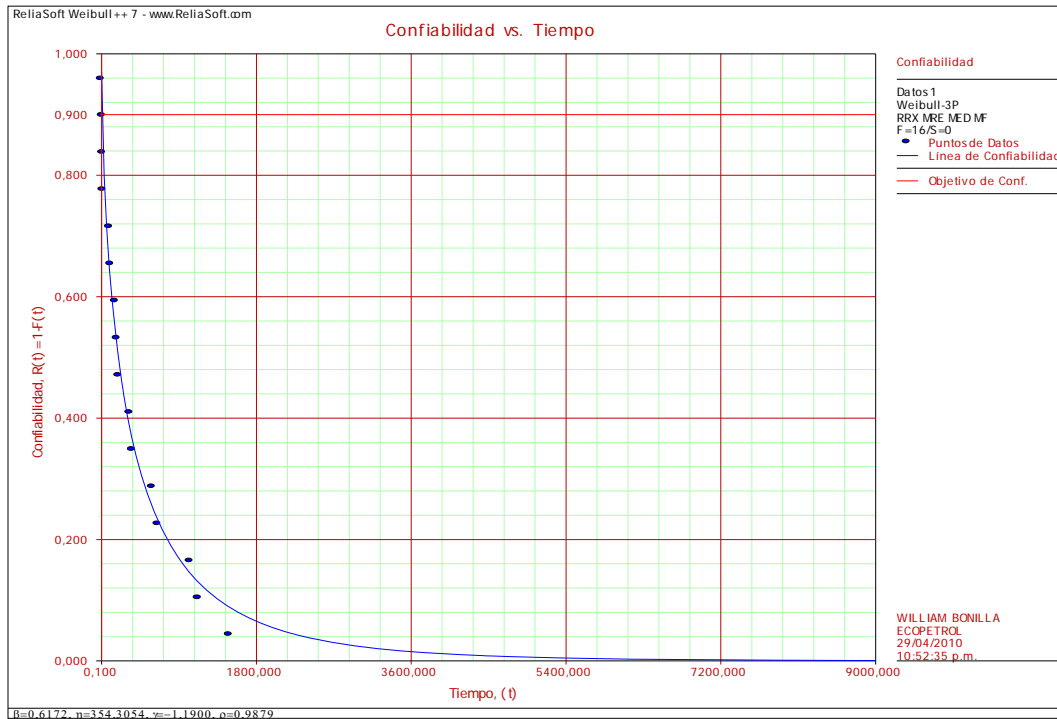
Si estas fallas caen dentro del intervalo de falla, podría tener las siguientes características:

- Errores humanos / Errores de mantenimiento
- Mantenimientos no asegurados por partes reemplazadas con un ciclo de vida no efectivo o partes sub estándares por falta de disponibilidad de repuestos originales (equipo obsoleto)
- Inadecuada carga de trabajo

Tabla 6. Diagnostico de confiabilidad Turbobomba 5

PERIODO DE TIEMPO (DIAS/HORAS)		CONFIABILIDAD
180	4320	0,070%
90	2160	0,86%
45	1080	4,53%
22	528	13,77%
8	192	34,88%
1	24	76,29%

Figura 21. Confiabilidad Turbobomba 5



Fuente: modelamiento software WEIBULL ++ 7

➤ Diagnostico de la Turbobomba 6.

Descripción del equipo:

Turbina: SOLAR

Velocidad turbina productora de gas: 22355 RPM

Velocidad turbina de potencia: 20923 RPM

Presión cámara de combustión: 57 psi

Presión de aceite: 54 psi

Temperatura tanque de aceite: 169 °F

Temperatura de aceite: 151 °F

Temperatura gases de salida: 814°F

Bomba: BAYRON JACKSON  
Velocidad: 5675 RPM  
Temperatura de carcasa: 98°F  
Temperatura cojinete axial: 127 °F  
Temperatura cojinete Radial: 111 °F  
Presión de succión: 45 psi  
Presión de descarga: 1645 psi  
Flujo: 12500 BOPD

El diagnostico de confiabilidad realizado con el software WEIBULL ++ 7 para la Turbobomba 6 de la planta de inyección 5 es:

$\beta = 0,6172$  (mortalidad infantil)

$\eta = 354,3054$  (vida característica)

$\gamma = -1,190$  (tan pronto se inicie la operación del equipo, se tienen probabilidades de fallas; fallas tempranas)

MTTF = 513,1801 horas

Los valores arrojados en la simulación están asociados a fallas por deterioro temprano y se puede evidenciar con el valor tan pequeño del tiempo promedio para fallar, que solo alcanza a tener un ciclo de operación normal de 21 días como lo señala el dato calculado de 513,81 horas.

Si estas fallas caen dentro del intervalo de falla, podría tener las siguientes características:

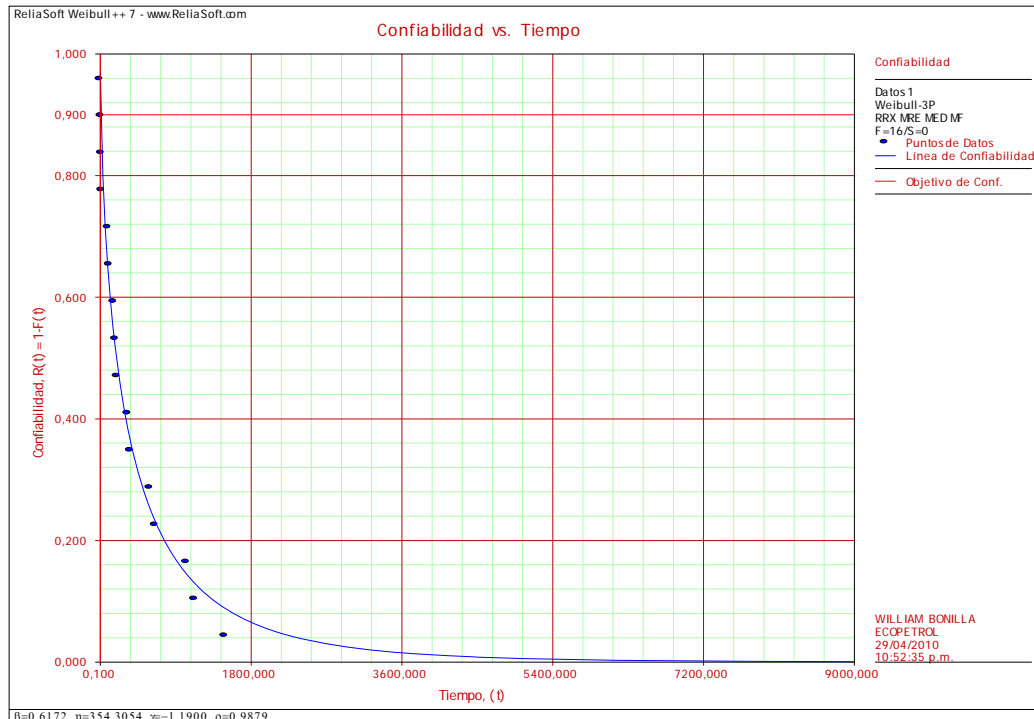
- Errores humanos / Errores de mantenimiento
- Mantenimientos no asegurados por partes reemplazadas con un ciclo de vida no efectivo o partes sub estándares por falta de disponibilidad de repuestos originales (equipo obsoleto)

- Inadecuada carga de trabajo

Tabla 7. Diagnostico de confiabilidad Turbobomba 6

PERIODO DE TIEMPO (DIAS/HORAS)		CONFIABILIDAD
180	4320	0,93%
90	2160	4,72%
45	1080	13,66%
22	528	27,78%
8	192	50,27%
1	24	82,23%

Figura 22. Confiabilidad Turbobomba 6



Fuente: modelamiento software WEIBULL ++ 7

Para más detalles del modelamiento y simulación de confiabilidad en las Turbobombas, ver anexo B.

### 3.3 DISPONIBILIDAD GENERICA E INDICADORES DE MANTENIBILIDAD Y CONFIABILIDAD DE LOS EQUIPOS DE INYECCION

A partir del análisis de los modos de falla asociados a cada Turbobomba y el dato arrojado del modelamiento en WEIBULL ++ 7 del MTTF (en horas) se calculan los datos de MTTR y MTBF para cada Turbobomba; con esto se logra calcular la disponibilidad genérica de los equipos en estudio.

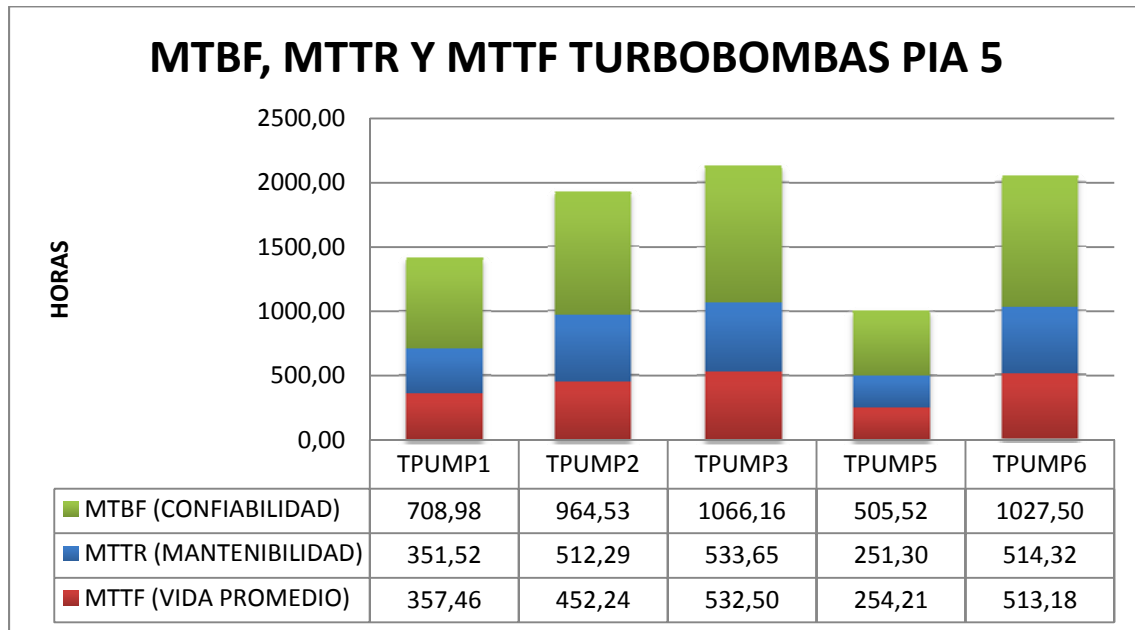
Tabla 8. Indicadores de mantenibilidad y confiabilidad Turbobombas

EQUIPO	MTTR (MANTENIBILIDAD)	MTBF (CONFIABILIDAD)	MTTF (VIDA PROMEDIO) <sup>17</sup>	DISPONIBILIDAD GENERICA Ao
TPUMP1	351,52	708,98	357,46	66,85%
TPUMP2	512,29	964,53	452,24	65,31%
TPUMP3	533,65	1066,16	532,50	66,64%
TPUMP5	251,30	505,52	254,21	66,79%
TPUMP6	514,32	1027,50	513,18	66,64%

Fuente: Base de datos mantenimiento Ecopetrol S.A y modelamiento en WEIBULL

++ 7

Figura 23. Confiabilidad y mantenibilidad Turbobombas planta de inyección 5

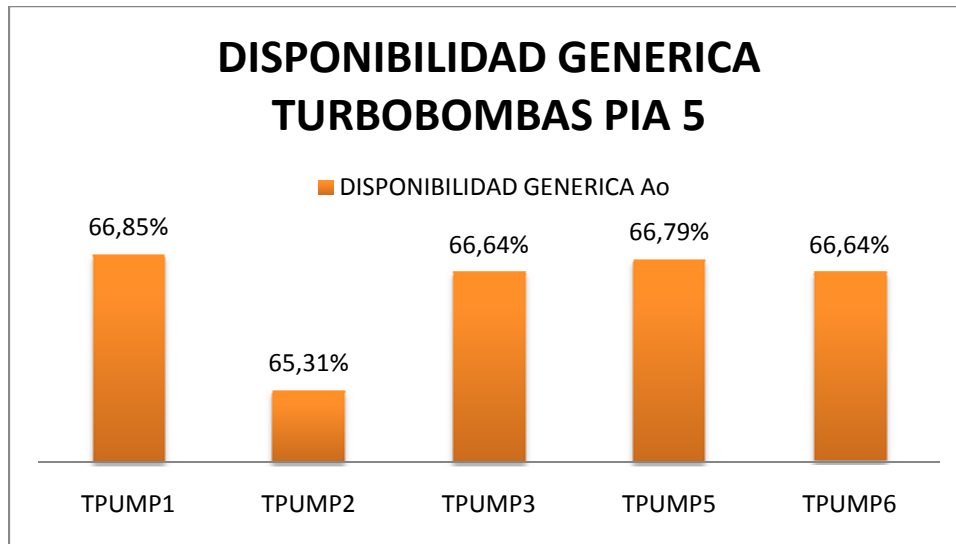


Fuente: Base de datos mantenimiento Ecopetrol S.A y modelamiento en WEIBULL

++ 7

<sup>17</sup> Parámetro obtenido con el modelamiento WEIBULL

Figura 24. Disponibilidad genérica en Turbobombas planta de inyección 5



Fuente: Base de datos mantenimiento Ecopetrol S.A y modelamiento en WEIBULL

++ 7

Interpretación:

TPUMP1: la probabilidad de que la Turbobomba 1 esté operando satisfactoriamente en el momento que sea requerido después del comienzo de su operación es de 66,85%.

TPUMP2: la probabilidad de que la Turbobomba 2 este operando satisfactoriamente en el momento que sea requerido después del comienzo de su operación es de 65,31%.

TPUMP3: la probabilidad de que la Turbobomba 3 este operando satisfactoriamente en el momento que sea requerido después del comienzo de su operación es de 66,64%.

TPUMP5: la probabilidad de que la Turbobomba 5 este operando satisfactoriamente en el momento que sea requerido después del comienzo de su operación es de 66,79%.

TPUMP6: la probabilidad de que la Turbobomba 6 este operando satisfactoriamente en el momento que sea requerido después del comienzo de su operación es de 66,64%.

### 3.4 EVALUACION DE LA DISPONIBILIDAD DE LOS EQUIPOS DE INYECCION DE LA PIA 5

En el campo la Cira infantas operado por Ecopetrol y siendo un activo en asociación con OXY andina cuenta con equipos de inyección bastante obsoletos en donde el agotamiento durante su vida útil ya cumplida es notorio.

Según los pronósticos de producción del proyecto de colaboración del campo la CIRA INFANTAS para el 2011, se tiene esperado la inyección de 700.000 barriles de agua, a la fecha se inyectan 470.000 barriles de agua y según contrato entre las partes se tiene como acuerdo la disponibilidad de 75.000 barriles de agua al día, lo cual no se está cumpliendo debido a la alta tasa de salidas de los equipos instalados en la planta cinco de inyección de agua.

La baja disponibilidad de la inyección parte del hecho de que se cuentan con equipos que presentan obsolescencia en el mercado que para nuestro caso son las turbinas SOLAR; las cuales deben ser reparadas en la casa matriz ya que no se cuenta con la tecnología para realizar esta actividad en los talleres de el centro de ECOPETROL, donde se ubica la superintendencia de operaciones de la Cira infantas. Se cuenta con la notificación de la casa matriz, de que las solicitudes de reparación y adquisición de repuestos están limitadas a la infraestructura actual de

la planta, la cual no puede dar el respaldo para dichas actividades y se recomienda la actualización o reemplazo de dichos equipos.

De acuerdo a los pronósticos de producción se esperaría que cada Turbobomba aportara 12500 barriles de agua al día. Sin embargo para el periodo de tiempo de análisis la Turbobomba 4 está por fuera debido a la falta de repuestos: tanto bomba como turbina.

Si se quisiera entonces rodar la inyección, con los equipos en planta esto es: Turbobombas 1, 2, 3,5 y 6 para lograr la meta de inyección al día, los resultados serian:

Tabla 9. Capacidad de inyección de agua por día de Turbobombas PIA 5 según disponibilidad genérica WEIBULL

EQUIPO	DISPONIBILIDAD GENERICA [%]	TIEMPO DE INYECCION EQUIVALENTE [h]	BARRILES DE AGUA INYECTADOS
TURBOBOMBA 1	66,8533	16,04	8357
TURBOBOMBA 2	65,3112	15,67	8164
TURBOBOMBA 3	66,6427	15,99	8330
TURBOBOMBA 5	66,7949	16,03	8349
TURBOBOMBA 6	66,6419	15,99	8330
TOTAL BARRILES DE AGUA PIA 5			41530
TOTAL BARRILES DE AGUA META PIA 5			75000
FALTANTE			33470

Fuente: Base de datos mantenimiento Ecopetrol S.A

Los barriles de agua inyectados con las actuales Turbobombas no cumple con las metas de disponibilidad; la ausencia de la Turbobomba 4 acentúa aun más la falta

de inyección de agua, toda vez que teóricamente cada Turbobomba puede aportar 12500 barriles de agua al día.

Si a esta situación le sumamos que una vez, alguna de las Turbobombas falle; el tiempo para restaurar su función es notorio, el cual como mínimo es 10 días y puede llegar hasta 22 días. El tiempo en restablecer la función de los equipos es comparable contra los tiempos de disponibilidad requerida; bastaría con que alguna de las Turbobombas salga de operación, para no cumplir con las metas de inyección.

El análisis aquí presentado es una guía para la presentación de propuestas que permitan mejorar la disponibilidad de inyección de agua en la planta de inyección

5.

#### 4. PROPUESTA PARA LA MEJORA DE LA DISPONIBILIDAD DE INYECCION DE LA PIA 5.

El diagnostico y evaluación de la disponibilidad de inyección en la PIA5 arroja el no cumplimiento de la cantidad de inyección requerida para el proyecto la Cira infantas Ecopetrol – OXY (Occidental de Colombia) para el contrato de colaboración entre las partes.

A continuación se hará una propuesta basado en la confiabilidad y disponibilidad requerida en el proyecto.

##### 4.1 BOMBA CENTRILIF-MOTOR ELECTRICO

Se plantea hacer la reposición de los equipos turbina – bomba por motor eléctrico – bomba.

Actualmente dentro del proceso de recuperación secundaria del campo se hace reinyección de agua; algunos de los equipos usados para esta labor constan de motor eléctrico y bombas multietapas. Basados en la buena experiencia de estos conjuntos en procesos de Re-inyección de agua en el campo y dada la alta capacidad de una bomba de este tipo, así como la alta confiabilidad de los motores eléctricos se procede a proponer el uso de bombas con motores de este tipo para reemplazar a los conjuntos turbina-bombas en el proceso de inyección.

Características de la bomba:

Bomba centrilif multietapa

Presión de descarga: 2000 psi

Caudal: 30000 BOPD

Velocidad: 3569 RPM

Características del motor:

Motor eléctrico tipo inducción, trifásico SIEMENS

Tensión: 4160 V

Corriente: 176 A

Frecuencia: 60 Hz

Velocidad: 3569

Potencia: 1250 HP

El uso de un motor eléctrico con bomba multietapa ayuda a reducir espacio físico para la reposición de los existentes. Bastaría con 2 conjuntos de 30000 BOPD y uno de 30000 BOPD para sumar lo suficiente en capacidad de inyección y cumplir el contrato de asociación Ecopetrol – OXY que señala una rata de 75000 BOPD.

Se tendrían 3 conjuntos en línea y un cuarto conjunto como estambay en lugar de 6 conjuntos como actualmente se tiene turbina-bomba.

A continuación se hará el análisis de confiabilidad del conjunto propuesto motor eléctrico – bomba multietapa a partir de los datos históricos de operación de estos equipos que se tienen en la planta de reinyección 5 A y datos de tasa de fallas según OREDA. En la figura 25 se muestra el conjunto motor-bomba propuesto.

Figura 25. Conjunto motor bomba instalado en la PIA5A



Fuente: Ecopetrol S.A

4.1.1 Confiabilidad y disponibilidad en motores eléctricos de media tensión. Según los modos y efectos de falla consultados en la OREDA<sup>18</sup> para esta clase de equipos se tiene:

Listado de modos de falla:

Lectura errónea en instrumentos

Rotor bloqueado

Salida o velocidad errónea

---

<sup>18</sup> ENI S.P.A/ AGIP Exploration & Production y otros. OREDA Offshore Reliability Data Handbook. Noruega: Sintef Industrial Management, 2002. p 333

Fuga externa en utilidad  
Falla al arrancar  
Falla al parar  
Baja velocidad  
Falla en servicios menores  
Ruido  
Otros  
Sobrecalentamiento  
Desviación de parámetros  
Falsa parada  
Estructura deficiente  
Desconocido  
Vibración

Sumados los tiempos medios de reparación promedio para todos los modos de falla, se encuentra que el MTTR equivale a 33,3 horas hombre<sup>19</sup>; un valor muy por debajo al presentado por las Turbobombas.

4.1.2 Confiabilidad y disponibilidad en bomba multietapas. Según los modos y efectos de falla consultados en la OREDA<sup>20</sup> para esta clase de equipos se tiene:

Listado de modos de falla:

Lectura anormal de instrumentos  
Eje bloqueado

---

<sup>19</sup> ENI S.P.A/ AGIP Exploration & Production y otros. OREDA Offshore Reliability Data Handbook. Noruega: Sintef Industrial Management, 2002. p 335

<sup>20</sup> ENI S.P.A/ AGIP Exploration & Production y otros. OREDA Offshore Reliability Data Handbook. Noruega: Sintef Industrial Management, 2002. p 172

Caudal de salida erróneo  
Fuga externa en utilidad  
Fuga externa en el proceso  
Falla al arrancar  
Falla al parar  
Alta presión de salida  
Fugas  
Baja presión de salida  
Falla en servicios menores  
Ruido  
Otros  
Sobrecalentamiento  
Desviación de parámetros  
Falsa parada  
Base deficiente  
Desconocido  
Vibración

Sumados los tiempos medios de reparación promedio para todos los modos de falla, se encuentra que el MTTR equivale a 27,4 horas hombre<sup>21</sup>; un valor muy por debajo al presentado por las Turbobombas.

Según los modos de falla expuestos para cada componente del sistema propuesto motor eléctrico – bomba, al considerar el conjunto como uno solo, como es el caso que nos ocupa, pues la propuesta contempla el cambio de cada conjunto turbina –

---

<sup>21</sup> ENI S.P.A/ AGIP Exploration & Production y otros. OREDA Offshore Reliability Data Handbook. Noruega: Sintef Industrial Management, 2002. p 175

bomba; El MTTR promedio para el conjunto propuesto equivale a 36,3 horas hombre<sup>22</sup>; un valor muy por debajo al ofrecido por los equipos existentes.

#### 4.2 EVALUACION COSTO/BENEFICIO EN LA REPOSICION DE LOS EQUIPOS TURBINA-BOMBA CENTRIFUGA POR MOTOR ELECTRICO-BOMBA MULTIETAPAS EN LA PLANTA DE INYECCION 5 PIA 5

A continuación se muestra el riesgo asociado al evento de continuar con la operación de inyección de agua en la PIA 5 o la reposición de los equipos por conjuntos motor eléctrico y bomba multietapa, bajo el escenario de la pérdida de producción o diferida que se tendría.

La expresión usada para estimar la relación costo /beneficio en la propuesta de reposición de equipos para la mejora en la disponibilidad de inyección en la planta es:

Costo / Beneficio:

$$J = \frac{\text{riesgo de no hacer la reposicion} - \text{riesgo de hacer la reposicion}}{\text{costo de hacer la reposicion}}$$

Otras expresiones a usar son:

---

<sup>22</sup> ENI S.P.A/ AGIP Exploration & Production y otros. OREDA Offshore Reliability Data Handbook. Noruega: Sintef Industrial Management, 2002. p 353

Riesgo de no hacer reposición:

$$r = \frac{\text{costo de la diferida} + \text{costo de mantenimiento correctivo}}{\text{probabilidad de ocurrencia}}$$

Donde:

Costo de la diferida: valor en pesos de los barriles de crudo equivalentes por día dejados de extraer, por la no inyección de agua según meta (12500 BOPD) por equipo. La relación barriles de crudo extraídos versus barriles de agua inyectada es 1 a 7 según datos del departamento de yacimientos Ecopetrol S.A y OXY.

Costo de mantenimiento correctivo: valor en pesos de mantener el equipo después de ocurrida una falla afectando su disponibilidad. Se obtiene de multiplicar el MTTR en horas del equipo por el número de horas-hombre necesarias en la reparación por el valor de la hora hombre más materiales o repuestos.

Probabilidad de ocurrencia: es el MTBF de cada equipo en días

Riesgo de hacer reposición:

$$R = \frac{\text{costo de reponer equipo} + \text{costo de mantenimiento correctivo}}{\text{probabilidad de ocurrencia}}$$

Aplican las mismas variables que en el anterior riesgo pero de los equipos nuevos propuestos. En este punto no se ocasiona diferida, por ser los equipos altamente disponibles y confiables. En lugar a esto se tiene el costo de la reposición o valor del activo a instalar propuesto.

Basados en que, el campo la Cira Infantas, cuenta con más de 40 MW-h disponibles para la alimentación de sus facilidades a partir de una línea de interconexión de 220 kV, se propone el uso de motores eléctricos para la propulsión de la bombas que realizan la inyección de agua a las formaciones o áreas del yacimiento.

4.2.1 Evaluación del riesgo en el cambio de los equipos de inyección. A continuación se presenta la valoración en términos de diferida de la planta de inyección 5 con la operación de las Turbobombas, basados en las estadísticas del departamento de producción y yacimientos de Ecopetrol S.A y OXY en que por cada 7 barriles de agua inyectados se logra extraer un barril de crudo así:

Datos:

Costo de barril: 40 dólares / barril

Tasa de cambio: \$1900/dólar

Valor hora hombre de mantenimiento: \$61000

Usando los datos de MTBF y MTTR ya calculados para las Turbobombas y pasándolos a años y días respectivamente se llega a:

Tabla 10. Probabilidad de falla y tiempo para reparar

EQUIPO	MTBF EN AÑOS	MTTR EN HORAS
TURBOBOMBA 1	0,08	351,52
TURBOBOMBA 2	0,11	512,29
TURBOBOMBA 3	0,12	533,65
TURBOBOMBA 5	0,06	251,30
TURBOBOMBA 6	0,12	514,32

A partir del tiempo para reparar un conjunto motor eléctrico – bomba de 36,3 horas y una disponibilidad genérica de 85% se llega a:

Tabla 11. Disponibilidad de inyección con equipos propuestos

EQUIPO	DISPONIBILIDAD GENERICA [%]	TIEMPO DE INYECCION EQUIVALENTE [h]	BARRILES DE AGUA INYECTADOS	MTTR EN HORAS
MOTOBOMBA 1	85	20,4	25500	36,30
MOTOBOMBA 2	85	20,4	25500	36,30
MOTOBOMBA 3	85	20,4	25500	36,30
MOTOBOMBA 4	85	20,4	25500	36,30

Finalmente empleando las expresiones de riesgo ya citadas se encuentra:

Tabla 12. Análisis del riesgo en la reposición de los equipos

EQUIPO	SISTEMA	BARRILES DE CRUDO DEJADOS DE EXTRAER POR BARRILES DE H2O NO INYECTADOS	BOPH NO EXTRAIDOS	\$ DIFERIDA SIN HACER REPOSICION
TURBOBOMBA 1	INYECCION	591,86	24,66	\$ 44.981.143
TURBOBOMBA 2	INYECCION	619,43	25,81	\$ 47.076.571
TURBOBOMBA 3	INYECCION	595,71	24,82	\$ 45.274.286
TURBOBOMBA 5	INYECCION	593,00	24,71	\$ 45.068.000
TURBOBOMBA 6	INYECCION	595,71	24,82	\$ 45.274.286

Los barriles de crudo dejados de extraer por barriles de agua no inyectados se obtienen como la diferencia entre la meta de inyección (12500 BOPD para cada Turbobomba y lo que por disponibilidad inyecta cada Turbobomba, según tabla 9)

El análisis de costo/beneficio se realiza para los cuatro conjunto motor-bomba propuestos, teniendo en cuenta que 3 conjuntos siempre operarían (3 x 30000 BOPD) y un equipo como reserva (30000 BOPD).

Tabla 13. Relación costo beneficio de la reposición de los equipos

<b>\$ TOTAL INVERSION</b>	<b>\$ RIESGO SIN REPOSICION</b>	<b>\$ RIESGO CON REPOSICION</b>	<b>COSTO/BENEFICIO =RIESGO SIN REPOSICION-RIESGO CON REPOSICION/INVERSI ON</b>
\$ 400.000.000	\$ 1.800.879.743	\$ 80.662.860	4,30
\$ 400.000.000	\$ 1.699.045.031	\$ 80.662.860	4,05
\$ 400.000.000	\$ 1.565.100.547	\$ 80.662.860	3,71
\$ 400.000.000	\$ 2.103.446.653	\$ 80.662.860	5,06

Con los datos aquí analizados y los equipos propuestos, lo que se busca es mostrar una oportunidad de mejora en la disponibilidad de los equipos usados en el proceso de inyección de agua. Esto se lograría haciendo la reposición de los equipos existentes con equipos de gran tecnología y altamente confiables (modernos comparados con los existentes que ya son obsoletos y no mantenibles, equipos con más de 25 años de operación).

Como referente para la propuesta es el uso de esta clase de equipos motor eléctrico – bomba multietapa en procesos de recuperación secundaria en campos petroleros. Como complemento al proceso de inyección de agua, existe la reinyección de agua, que no es más, que el agua que se logra recuperar cuando se hace la extracción de crudo y este se separa del agua, la cual fue, previamente

inyectada para estimular la columna de crudo en el yacimiento para que así sea extraído con el uso de unidades de bombeo mecánico; Esta acción complementaria en el campo la Cira Infantas, se hace con el uso de motores eléctricos con bombas multietapas con muy buenos resultados.

## 5. CONCLUSIONES

Se logra valorar el estado actual de la disponibilidad de inyección de la planta 5 a partir del modelamiento en WEIBULL ++7 de los tiempos de operación hasta la falla de cada Turbobomba. En este punto se identifican tópicos que influyen en la baja disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

Se genera un reporte con las curvas de confiabilidad de las Turbobombas usadas en el proceso de inyección de agua, como parte del programa de recuperación secundaria del campo la Cira Infantas Ecopetrol S.A y OXY. En este reporte se detallan los tópicos del modelamiento en WEIBULL ++7.

Se evalúa la mantenibilidad, disponibilidad y confiabilidad a partir de la simulación en la herramienta WEIBULL ++ 7 frente a las metas de inyección de agua según acuerdo de colaboración entre Ecopetrol S.A y OXY. Esta evaluación arroja la baja disponibilidad y lo poco mantenibles que son las Turbobombas, para el proceso que llevan a cabo en la planta de inyección 5.

Se realiza una propuesta de reposición de equipos con el fin de mejorar la disponibilidad de inyección de agua y así cumplir con los acuerdos establecidos entre Ecopetrol S.A y OXY. En este punto se señala el cambio de Turbobombas por conjunto Motor Eléctrico y Bomba Multietapa como una opción viable desde el punto de vista de la disponibilidad de inyección, mantenibilidad o tiempos para mantener. Para esto se calcula la relación costo /beneficio de hacer la reposición de las Turbobombas obteniendo relaciones superiores a 1; Es decir garantizando la viabilidad de la reposición.

## BIBLIOGRAFIA

BARLOW, Richard. Engineering Reliability. New Cork: Board SIAM, 1998.

BLANCHARD, Benjamin y otros. MAINTAINABILITY: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1995. p 14

DIAZ MATALOBOS, Ángel. Confiabilidad en mantenimiento. Caracas, Venezuela: IESA, 1992. p 21

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Caracas, Venezuela: IESA, 1992. p 8

ENI S.P.A/ AGIP Exploration & Production y otros. OREDA Offshore Reliability Data Handbook. Noruega: Sintef Industrial Management, 2002. p 333

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Noruega: Sintef Industrial Management, 2002. p 335

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Noruega: Sintef Industrial Management, 2002. p 172

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Noruega: Sintef Industrial Management, 2002. p 175

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Noruega: Sintef Industrial Management, 2002. p 353

KNEZEVIC, Jezdimir. Mantenibilidad. Madrid, España: Isdefe, 1996. p 21.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Madrid, España: Isdefe, 1996. p 47

O'CONNOR, Patrick D.T. Practical Reliability Engineering. New York, NY, USA:  
John Wiley & Sons, 1989. p 45.

RAMAKUMAR, R. Engineering Reliability: Fundamentals and Applications.  
Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1993. p 8

Reliasoft, Rio de Janeiro: RS401, p. 286

ROJAS, Jaime. Introducción a la Confiabilidad. Bogotá, Colombia: Universidad de  
los Andes, 1975. p. 3.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes, 1975. p 7.

ANEXOS

## ANEXO A. TIEMPOS DE OPERACIÓN EN HORAS HASTA LA FALLA TURBOBOMBAS PIA5

Turbobomba 1:

The screenshot displays the ReliaSoft Weibull++ 7 software interface. The main window shows a data table with the following columns: 'Tiempo de Falla' (Time to Failure) and 'ID del Subconjunto' (Subset ID). The data points are as follows:

Folio	Tiempo de Falla	ID del Subconjunto
1	7	
2	12,5	
3	14	
4	22	
5	22	
6	22	
7	33	
8	92,5	
9	95	
10	95,5	
11	96	
12	136	
13	226	
14	245	
15	249	
16	311	
17	324	
18	351	
19	487	
20	498	
21	550,5	
22	643	
23	745,5	
24	858	
25	1103,5	
26		
27		
28		
29		
30		
31		

The right-hand panel shows the 'Distribución' (Distribution) settings, currently set to 'Weibull'. The 'Parámetros/Tipo' (Parameters/Type) section includes:

- Radio buttons for 1, 2, and 3 (3 is selected).
- Radio buttons for 'Mixta' and 'MFC'.
- Beta: 0,6504
- Eta: 257,4620
- Gamma: 5,9600
- Rho: 0,9868
- Valor de LK: -165,2001

The 'Configuración' (Configuration) section shows:

- RRX: [ ] MRE: [ ]
- MF: [ ] MED: [ ]
- Calculado: F=25/S=0

The 'Resumen del Análisis' (Analysis Summary) section shows 'P()=...' with a dropdown arrow.

The bottom status bar indicates: 'Folio cargados: 1', 'Activo Folio "Folio 1"', 'Proyecto: C:\Users\william\Documents\ESPECIALIZACION\DESARROLLO DE MONOGRAFIA\SIMULACION WEIBULL++7\TURBOBOMBA 1 PIA5.rso7', and 'Disponibles: 56,619'. The taskbar shows the system time as 12:51 p.m.

## Turbobomba 2:

The screenshot displays the ReliaSoft Weibull++ software interface. The main window shows a data table for 'TURBOBOMBA 2 PIA5' with the following data:

	Tiempo de Falla	ID del Subconjunto
1	10	
2	11	
3	19	
4	95	
5	115	
6	188	
7	226	
8	245	
9	249	
10	286	
11	310,5	
12	384	
13	498	
14	524	
15	745,5	
16	840	
17	855	
18	906	
19	1029	
20	1235	
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		
31		

The right-hand panel shows the distribution settings for a Weibull distribution:

- Distribución:** Weibull
- Parámetros/Tipo:**
  - Radio buttons: 1, 2, 3 (3 is selected)
  - Radio buttons: Mixta, MFC
- Parámetros:**
  - Beta: 1,2635
  - Eta: 551,3612
  - Gamma: -60,0500
  - Rho: 0,9786
  - Valor de LK: -142,9882
- Configuración:**
  - RRX, MRE, MF, MED
  - Calculado: F=20/S=0
- Resumen del Análisis:** P()=...

The taskbar at the bottom shows the project path: C:\Users\william\Documents\ESPECIALIZACION\DESARROLLO DE MONOGRAFIA\SIMULACION WEIBULL ++7\TURBOBOMBA 2 PIA5.rso7. The system clock indicates 12:58 p.m.

### Turbobomba 3:

The screenshot displays the ReliaSoft Weibull++ software interface. The main window shows a data table with the following columns: 'Tiempo de Falla' (Time to Failure) and 'ID del Subconjunto' (Subset ID). The data points are as follows:

Row	Tiempo de Falla	ID del Subconjunto
1	1	
2	5	
3	15,5	
4	95	
5	139	
6	141,5	
7	202	
8	262	
9	301	
10	309	
11	503	
12	903,5	
13	911	
14	1219	
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		
31		

On the right side, the 'Distribución' (Distribution) panel is set to 'Weibull'. The 'Parámetros/Tipo' (Parameters/Type) section shows:

- Radio buttons for 1, 2, and 3, with 3 selected.
- Options for 'Mixta' and 'MFC'.
- Parameter values: Beta = 0,5889; Eta = 346,0063; Gamma = -1,1025; Rho = 0,9770; Valor de LK = -96,3101.

The 'Configuración' (Configuration) section shows 'RRX' and 'MRE' selected, with 'Calculado' (Calculated) set to 'F=14/S=0'. The 'Resumen del Análisis' (Analysis Summary) section shows 'P()=...'.

The taskbar at the bottom shows the following open applications: Google, MONOG..., 2 Micro..., ReliaSoft..., Turbinas..., and ntc1486... The system clock indicates 12:59 p.m.

## Turbobomba 5:

The screenshot displays the ReliaSoft Weibull++ 7 software interface. The main window shows a data table for 'TURBOBOMBA 5 PIAS' with the following columns: 'Tiempo de Falla' (Time to Failure) and 'ID del Subconjunto' (Subset ID). The data points are as follows:

ID	Tiempo de Falla	ID del Subconjunto
1	3,5	
2	6	
3	10,5	
4	16	
5	17,5	
6	19	
7	34	
8	42	
9	48	
10	48	
11	54,5	
12	84	
13	107	
14	117	
15	118	
16	191	
17	192	
18	264	
19	281	
20	334	
21	423	
22	663	
23	986	
24	2471	
25		
26		
27		
28		
29		
30		
31		

The right-hand panel shows the 'Distribución' (Distribution) settings for a Weibull distribution. The parameters are:

- Beta: 0,6193
- Eta: 173,8405
- Gamma: 2,9325
- Rho: 0,9935
- Valor de LK: -151,3859

The 'Configuración' (Configuration) section shows 'RRX' and 'MRE' selected, with 'Calculado' (Calculated) set to F=24/S=0. The 'Resumen del Análisis' (Analysis Summary) section shows 'P()=...'.

The taskbar at the bottom indicates the active project is 'C:\Users\william\Documents\ESPECIALIZACION\DESARROLLO DE MONOGRAFIA\SIMULACION WEIBULL++7\TURBOBOMBA 5 PIAS.rso7' and the system time is 01:00 p.m.

Turbobomba 6:

The screenshot displays the ReliaSoft Weibull++ 7 interface. The main window shows a data table for 'TURBOBOMBA 6 PIA5' with columns for 'Tiempo de Falla' (Failure Time) and 'ID del Subconjunto' (Subset ID). The data points are as follows:

Row	Tiempo de Falla	ID del Subconjunto
1	1	
2	12	
3	16	
4	18	
5	96	
6	110,5	
7	162	
8	182,5	
9	203,5	
10	330,5	
11	360	
12	594	
13	658,5	
14	1032	
15	1127	
16	1486	
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		
31		

On the right side, the 'Distribución' (Distribution) panel is set to 'Weibull'. The 'Parámetros/Tipo' (Parameters/Type) section shows:

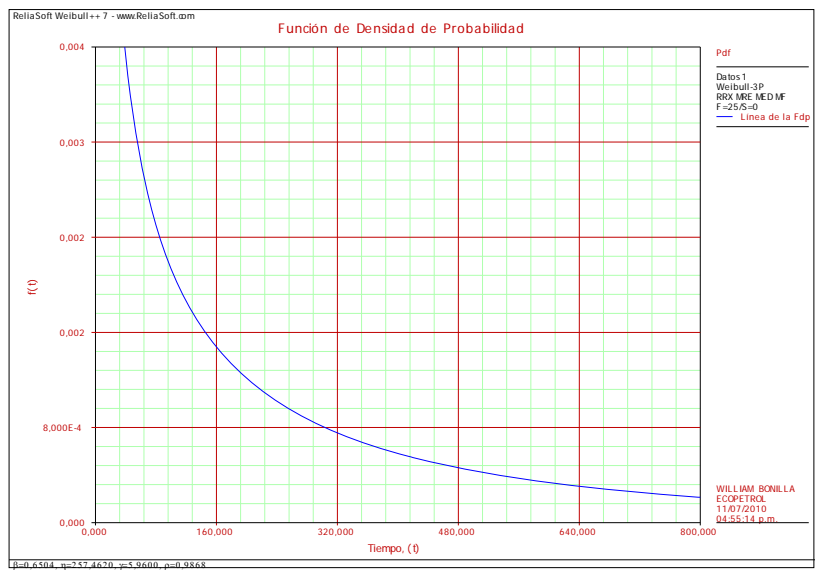
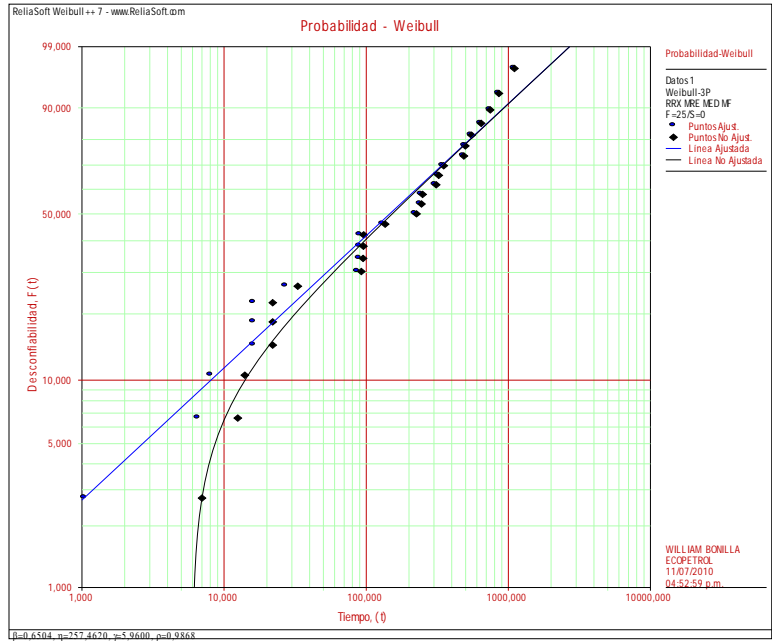
- Radio buttons for 1, 2, and 3, with 3 selected.
- Radio buttons for 'Mixta' and 'MFC', with 'MFC' selected.
- Beta: 0,6172
- Eta: 354,3054
- Gamma: -1,1900
- Rho: 0,9879
- Valor de LK: -110,9428

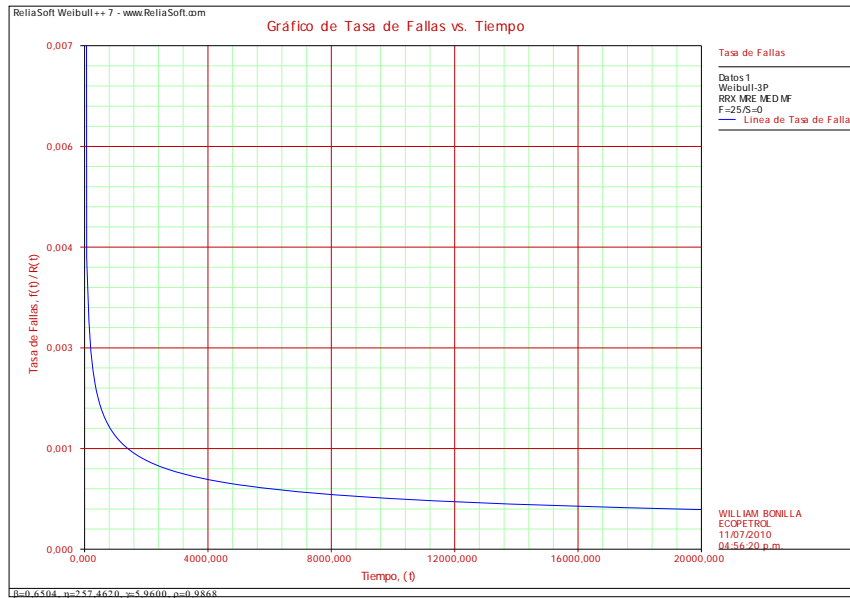
The 'Configuración' (Configuration) section includes options for 'RRX', 'MRE', 'MF', and 'MED', with 'Calculado' (Calculated) selected. Below that, 'Resumen del Análisis' (Analysis Summary) shows 'P()=...'.

The Windows taskbar at the bottom shows the active window is 'ReliaSoft ...' and the system clock indicates 01:02 p.m.

# ANEXO B. INFORME RESUMEN DE MODELAMIENTO WEIBULL DE LAS TURBOBOMBAS DE LA PIA 5

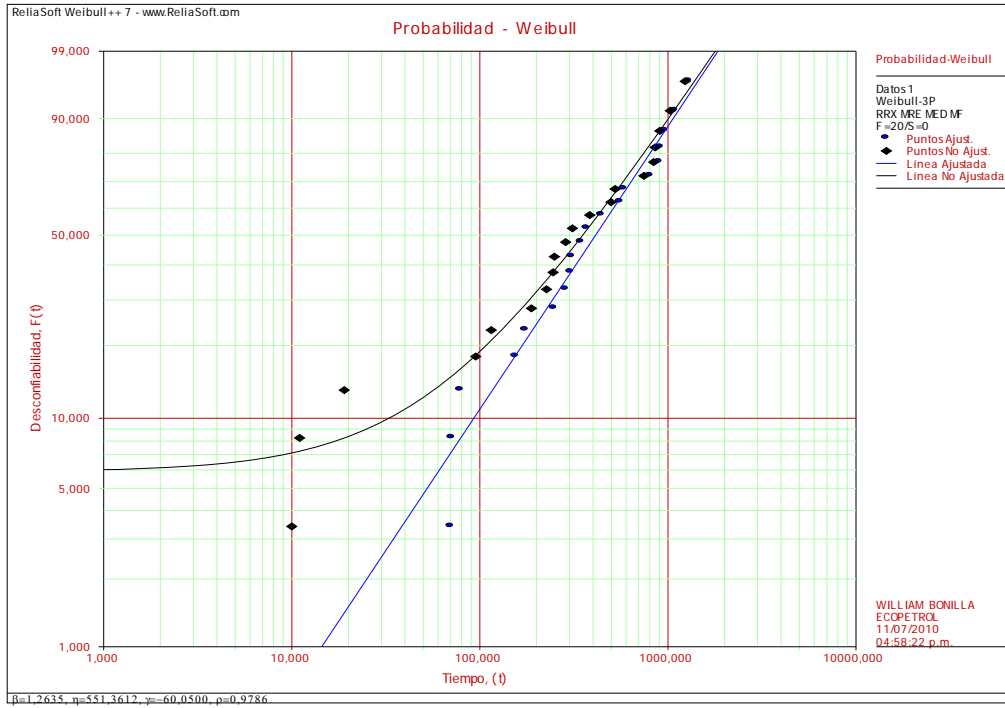
Turbobomba 1:

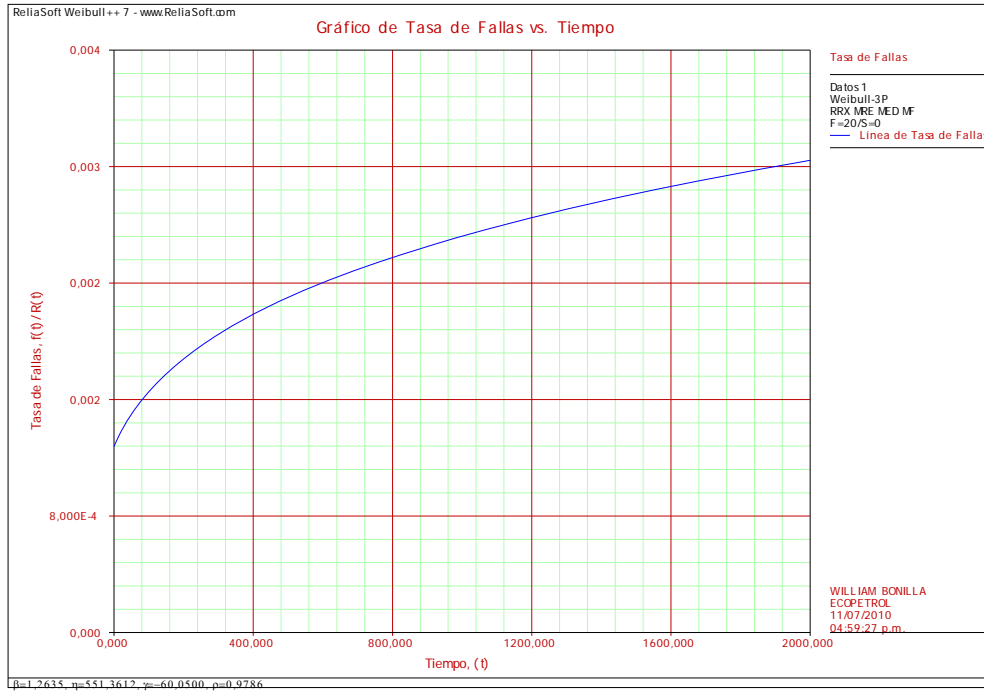




CALCULO DE CONFIABILIDAD		CONFIABILIDAD CONDICIONAL		VIDA PROMEDIO	
Fecha: mar 08, 2010		Fecha: mar 08, 2010		Fecha: mar 08, 2010	
Usuario: WILLIAM BONILLA		Usuario: WILLIAM BONILLA		Usuario: WILLIAM BONILLA	
Empresa: ECOPETROL		Empresa: ECOPETROL		Empresa: ECOPETROL	
Entrada del Usuario:		Entrada del Usuario:		Entrada del Usuario:	
Tiempo Final de la Misión =	24	Tiempo Inicial de la Misión =	24	Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola
Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola	Tiempo de Misión Adicional =	100	Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher
Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher	Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola	Nivel de Confianza =	0,9
Nivel de Confianza =	0,9	Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher		
		Nivel de Confianza =	0,9	Resultados de Weibull++ 7:	
Resultados de Weibull++ 7:				Vida Promedio =	357,4607
Confiabilidad =	0,8259	Resultados de Weibull++ 7:		Inferior =	232,4591
Inferior =	0,5227	Confiabilidad Cond. =	0,654	Confianza =	1S @ 0,9
Confianza =	1S @ 0,9	Inferior =	0,5675		
		Confianza =	1S @ 0,9		
				ECOPETROL QCP	
ECOPETROL QCP				Final de Resultados Rápidos	
Final de Resultados Rápidos		ECOPETROL QCP			
		Final de Resultados Rápidos			

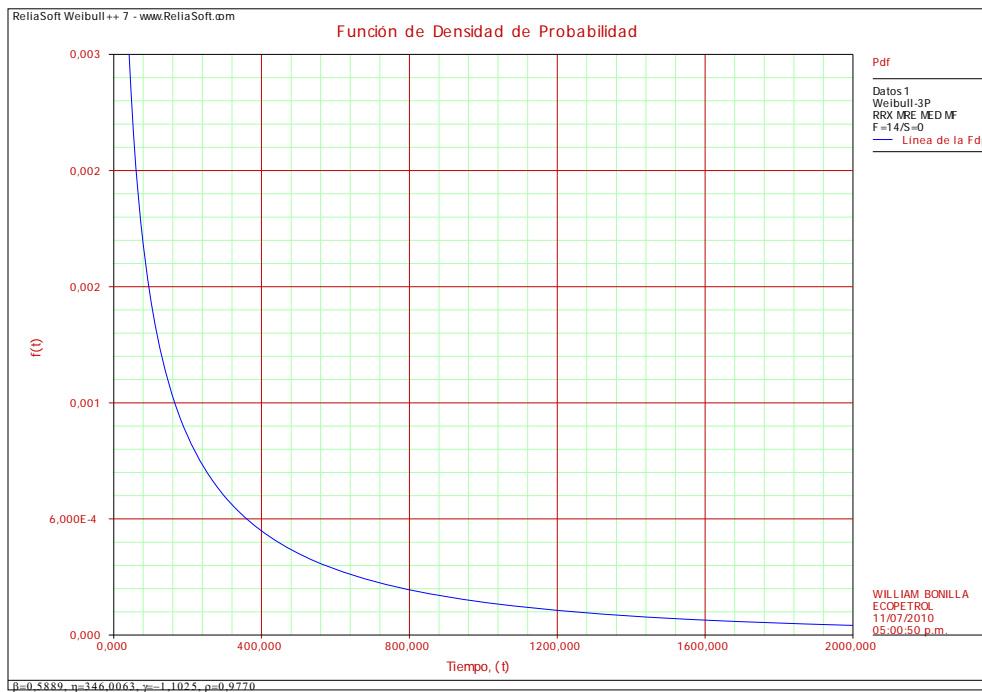
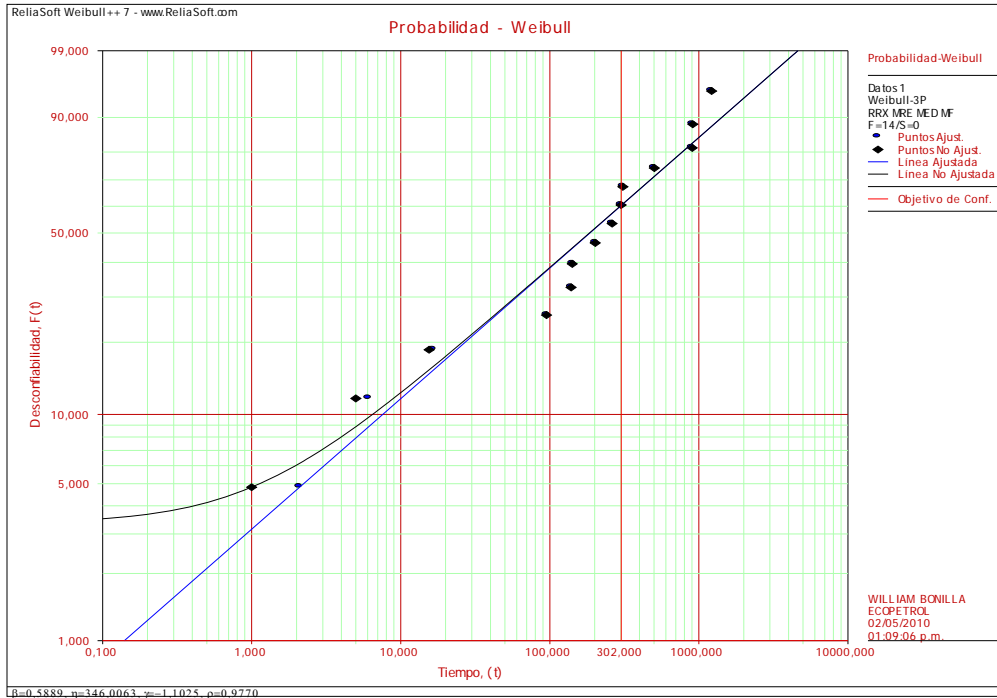
## Turbobomba 2:

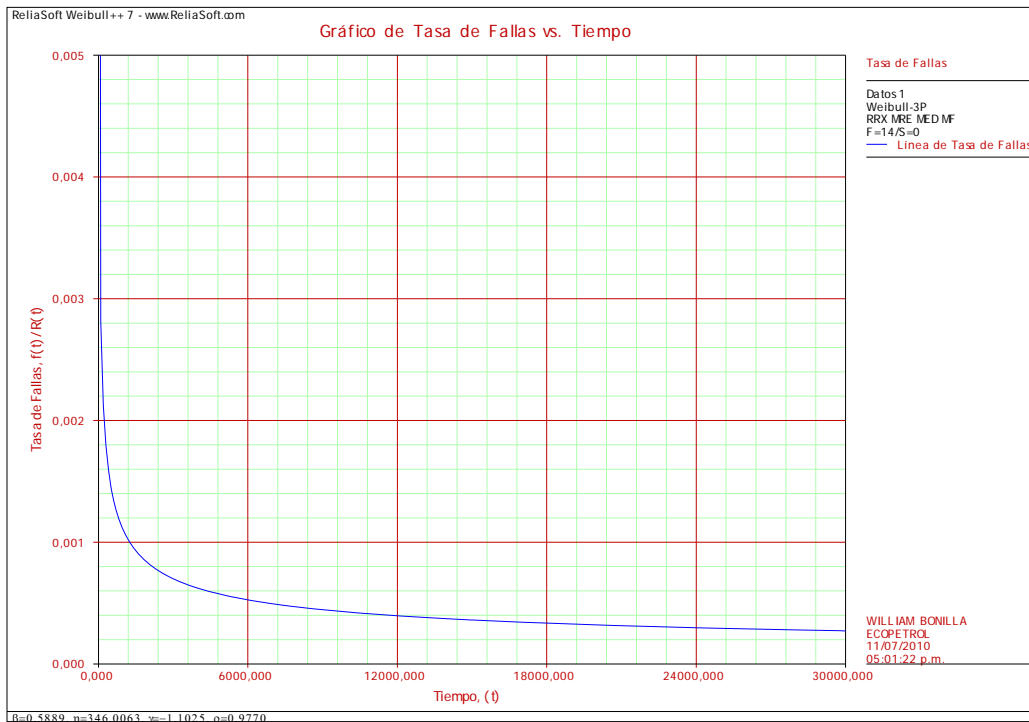




CALCULO DE CONFIABILIDAD		CONFIABILIDAD CONDICIONAL		VIDA PROMEDIO	
Fecha: mar 08, 2010		Fecha: mar 08, 2010		Fecha: mar 08, 2010	
Usuario: WILLIAM BONILLA		Usuario: WILLIAM BONILLA		Usuario: WILLIAM BONILLA	
Empresa: ECOPETROL		Empresa: ECOPETROL		Empresa: ECOPETROL	
Entrada del Usuario:		Entrada del Usuario:		Entrada del Usuario:	
Tiempo Final de la Misión =	24	Tiempo Inicial de la Misión =	24	Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola
Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola	Tiempo de Misión Adicional =	100	Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher
Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher	Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola	Nivel de Confianza =	0,9
Nivel de Confianza =	0,9	Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher		
		Nivel de Confianza =	0,9	Resultados de Weibull++ 7:	
Resultados de Weibull++ 7:				Vida Promedio =	452,2457
Confiabilidad =	0,9113	Resultados de Weibull++ 7:		Inferior =	340,263
Inferior =	0,8313	Confiabilidad Cond. =	0,8546	Confianza =	1S @ 0,9
Confianza =	1S @ 0,9	Inferior =	0,7925		
		Confianza =	1S @ 0,9		
ECOPETROL QCP				ECOPETROL QCP	
Final de Resultados Rápidos		ECOPETROL QCP		Final de Resultados Rápidos	
		Final de Resultados Rápidos			

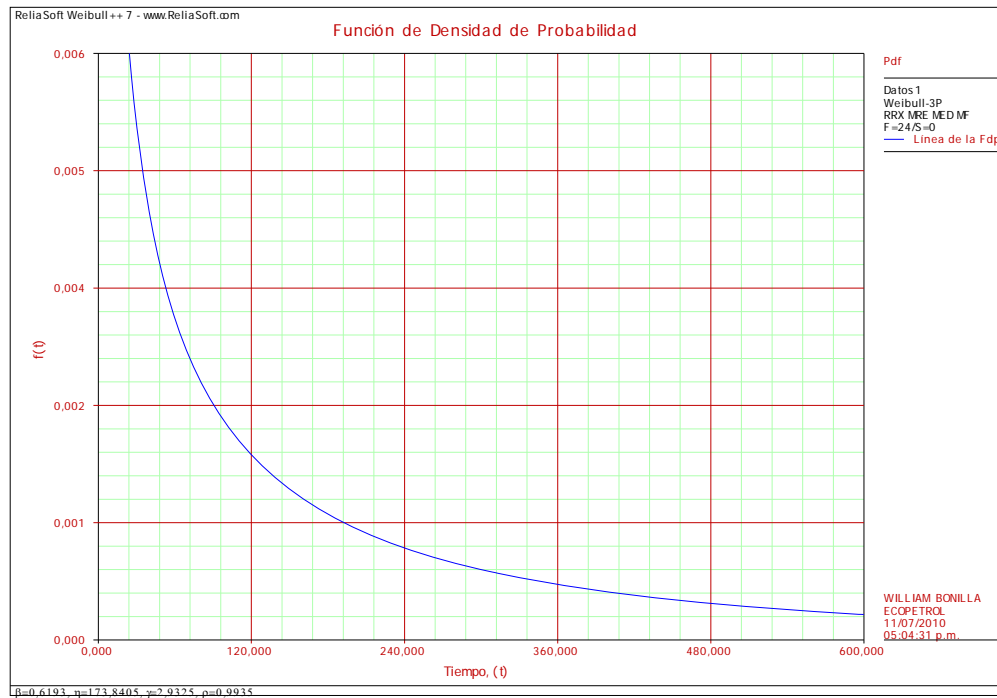
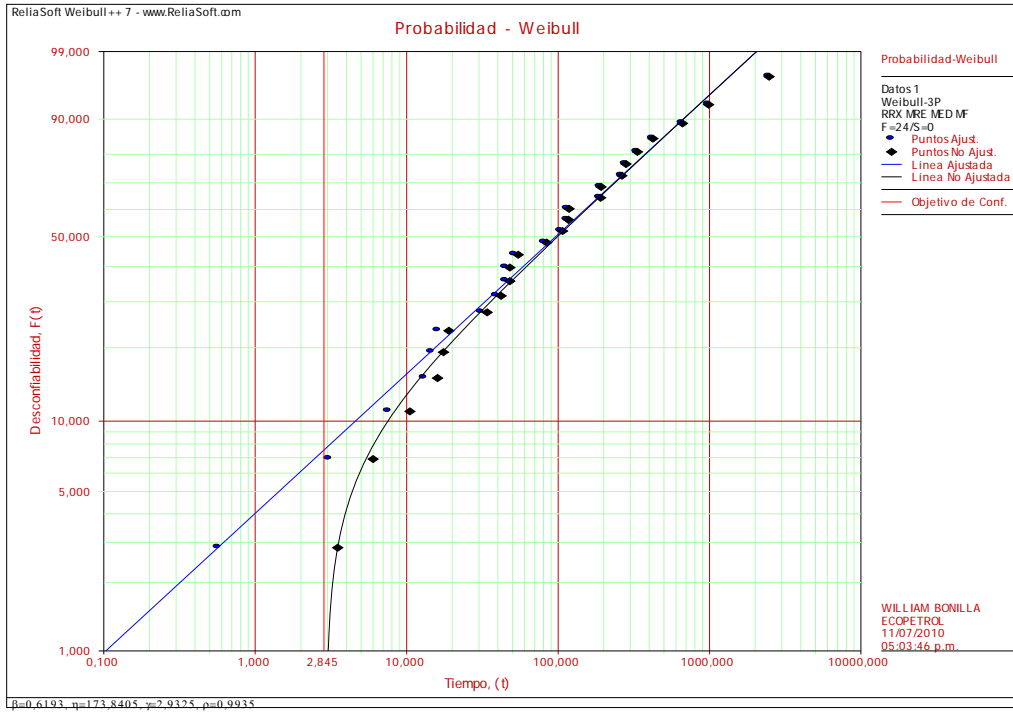
# Turbobomba 3:

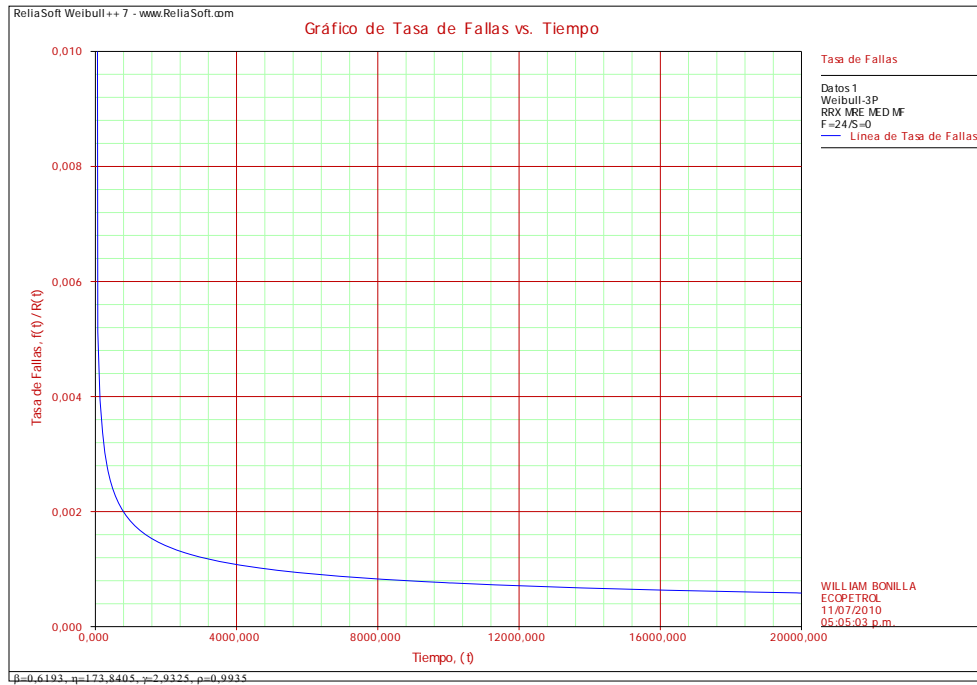




CALCULO DE CONFIABILIDAD		CONFIABILIDAD CONDICIONAL		VIDA PROMEDIO	
Fecha: mar 08, 2010		Fecha: mar 08, 2010		Fecha: mar 08, 2010	
Usuario: WILLIAM BONILLA		Usuario: WILLIAM BONILLA		Usuario: WILLIAM BONILLA	
Empresa: ECOPETROL		Empresa: ECOPETROL		Empresa: ECOPETROL	
Entrada del Usuario:		Entrada del Usuario:		Entrada del Usuario:	
Tiempo Final de la Misión =	24	Tiempo Inicial de la Misión =	24	Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola
Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola	Tiempo de Misión Adicional =	100	Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher
Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher	Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola	Nivel de Confianza =	0,9
Nivel de Confianza =	0,9	Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher		
		Nivel de Confianza =	0,9	Resultados de Weibull++ 7:	
Resultados de Weibull++ 7:				Vida Promedio =	532,5058
Confiabilidad =	0,8079	Resultados de Weibull++ 7:		Inferior =	257,8976
Inferior =	0,6723	Confiabilidad Cond. =	0,7146	Confianza =	1S @ 0,9
Confianza =	1S @ 0,9	Inferior =	0,6001		
		Confianza =	1S @ 0,9		
				ECOPETROL QCP	
ECOPETROL QCP				Final de Resultados Rápidos	
Final de Resultados Rápidos		ECOPETROL QCP			

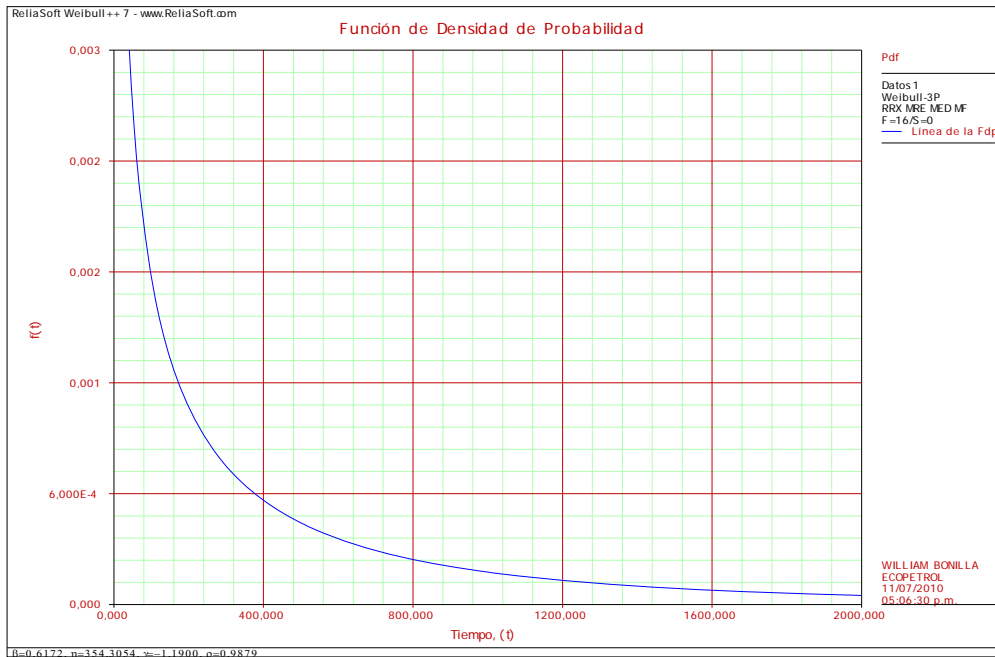
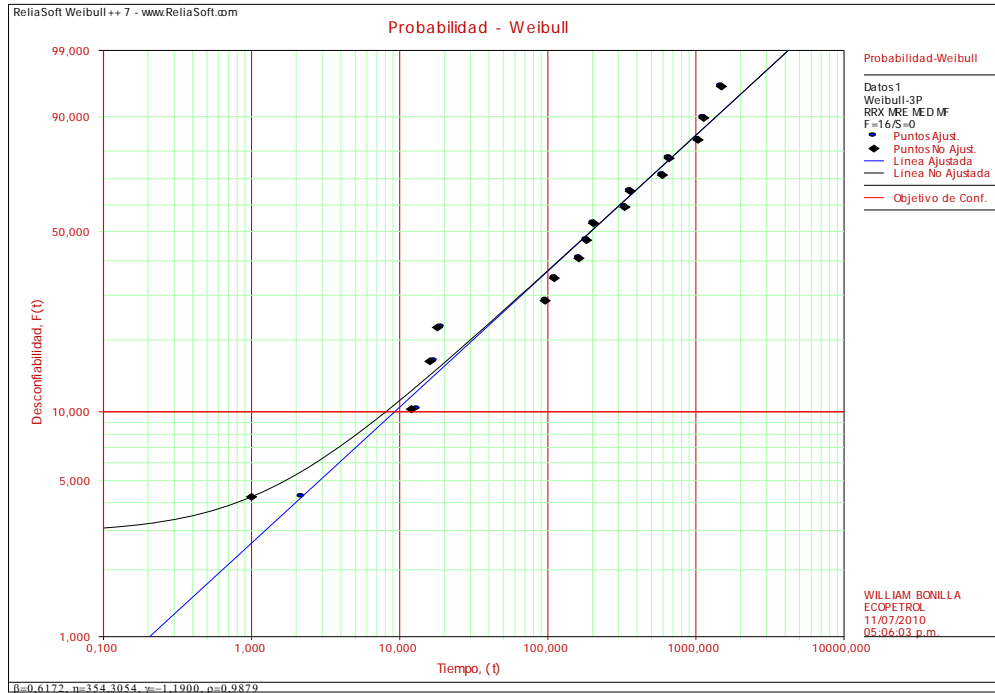
# Turbobomba 5:

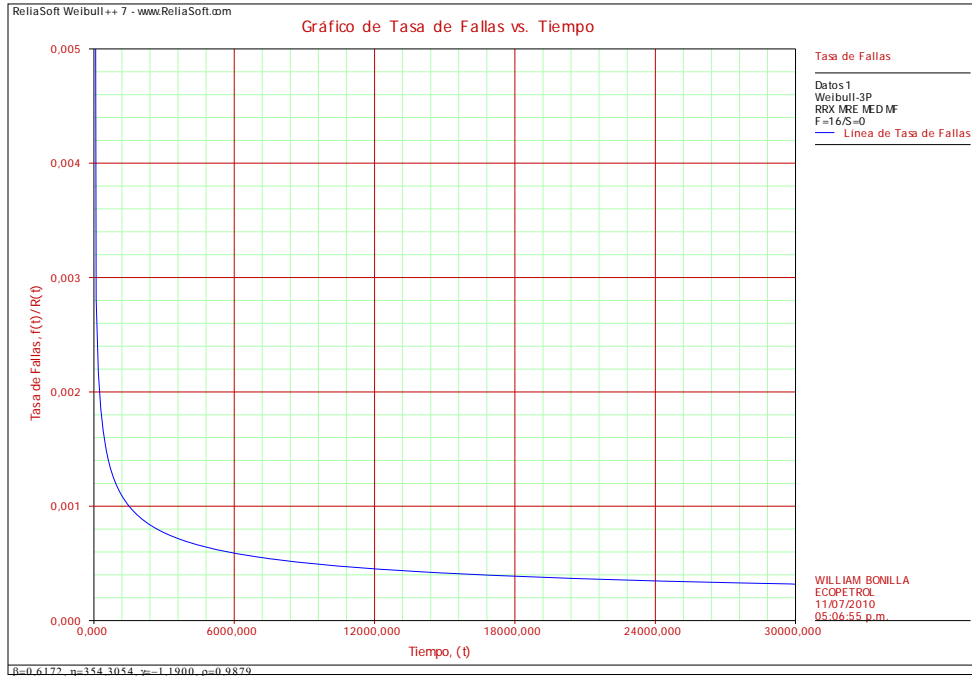




CALCULO DE CONFIABILIDAD		CONFIABILIDAD CONDICIONAL		VIDA PROMEDIO	
Fecha: mar 08, 2010		Fecha: mar 08, 2010		Fecha: mar 08, 2010	
Usuario: WILLIAM BONILLA		Usuario: WILLIAM BONILLA		Usuario: WILLIAM BONILLA	
Empresa: ECOPETROL		Empresa: ECOPETROL		Empresa: ECOPETROL	
Entrada del Usuario:		Entrada del Usuario:		Entrada del Usuario:	
Tiempo Final de la Misión =	24	Tiempo Inicial de la Misión =	24	Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola
Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola	Tiempo de Misión Adicional =	100	Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher
Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher	Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola	Nivel de Confianza =	0,9
Nivel de Confianza =	0,9	Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher		
		Nivel de Confianza =	0,9	Resultados de Weibull++ 7:	
Resultados de Weibull++ 7:				Vida Promedio =	254,2139
Confiabilidad =	0,7629	Resultados de Weibull++ 7:		Inferior =	167,1615
Inferior =	0,6585	Confiabilidad Cond. =	0,5894	Confianza =	1S @ 0,9
Confianza =	1S @ 0,9	Inferior =	0,5036		
		Confianza =	1S @ 0,9		
				ECOPETROL QCP	
ECOPETROL QCP				Final de Resultados Rápidos	
Final de Resultados Rápidos		ECOPETROL QCP			

# Turbobomba 6:





CALCULO DE CONFIABILIDAD		CONFIABILIDAD CONDICIONAL		VIDA PROMEDIO	
Fecha: mar 08, 2010		Fecha: mar 08, 2010		Fecha: mar 08, 2010	
Usuario: WILLIAM BONILLA		Usuario: WILLIAM BONILLA		Usuario: WILLIAM BONILLA	
Empresa: ECOPETROL		Empresa: ECOPETROL		Empresa: ECOPETROL	
Entrada del Usuario:		Entrada del Usuario:		Entrada del Usuario:	
Tiempo Final de la Misión =	24	Tiempo Inicial de la Misión =	24	Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola
Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola	Tiempo de Misión Adicional =	100	Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher
Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher	Límites de Confianza Utilizados:	Una Cola	Nivel de Confianza =	0,9
Nivel de Confianza =	0,9	Método para Límites de Confianza:	Matriz de Fisher		
		Nivel de Confianza =	0,9	Resultados de Weibull++ 7:	
Resultados de Weibull++ 7:				Vida Promedio =	513,1801
Confiabilidad =	0,8223	Resultados de Weibull++ 7:		Inferior =	284,3075
Inferior =	0,6994	Confiabilidad Cond. =	0,7185	Confianza =	1S @ 0,9
Confianza =	1S @ 0,9	Inferior =	0,6204		
		Confianza =	1S @ 0,9		
				ECOPETROL QCP	
ECOPETROL QCP				Final de Resultados Rápidos	
Final de Resultados Rápidos		ECOPETROL QCP			

## Resumen:

INFORME RESUMEN									
TIEMPO DE EMISION		24 HORAS							
PROBABILIDAD CONDICIONAL		100							
VARIABLES	TB1	TB2	TB3	TB5	TB6	MAX	EQUIPO	MIN	EQUIPO
R(T)	83%	91%	81%	76%	82%	91%	TB2	76%	TB5
R(T,t)	65%	85%	71%	59%	72%	85%	TB2	59%	TB5
MTTF	357,4607	452,2457	532,5058	254,2139	513,1801	532,51	TB3	254,2139	TB5

