



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
POSGRADO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

ANÁLISIS DE WEIBULL TRIPARÁMETRO APLICADO AL
SISTEMA DE COMPRESIÓN DE GAS DE LA ESTACIÓN LIZAMA
DE ECOPETROL S.A

CARLOS ANTONIO ORTIZ MACHUCA
VICENTE JAVIER SOLANO RODRÍGUEZ



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2016

ANÁLISIS DE WEIBULL TRIPARÁMETRO APLICADO AL
SISTEMA DE COMPRESIÓN DE GAS DE LA ESTACIÓN LIZAMA
DE ECOPETROL S.A

CARLOS ANTONIO ORTIZ MACHUCA

VICENTE JAVIER SOLANO RODRÍGUEZ

Monografía de grado para optar al título de Especialista en Gerencia de
Mantenimiento

Director

DANIEL ORTIZ PLATA

Especialista en Gerencia de Mantenimiento

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

CARLOS ORTIZ

A mis padres

Luis Carlos Ortiz Borrero

Victer Rosa Machuca Rangel

A mi Novia

Gianina Garrido Silva

A mi hermana

Vikter Margarita Ortiz Machuca

A mi nona

Margarita Borrero de Ortiz

VICENTE SOLANO

A mis padres

Vicente Solano Palomino

Elvia María Rodríguez de Solano

A mi Esposa

Melisa Parra Nuñez

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Daniel Ortiz, director del proyecto, por su dirección y asesoría la cual pudo asegurar la sinergia que consolidó el producto final.

Resumen

TÍTULO: ANÁLISIS DE WEIBULL TRIPARÁMETRO APLICADO AL SISTEMA DE COMPRESIÓN DE GAS DE LA ESTACIÓN LIZAMA DE ECOPETROL S.A*

AUTORES: CARLOS ANTONIO ORTIZ MACHUCA**

VICENTE JAVIER SOLANO RODRÍGUEZ *****

PALABRAS CLAVES: Análisis de Weibull, Confiabilidad, Sistema de compresión de gas.

DESCRIPCIÓN:

El sector minero-energético y petroquímico está encaminado al mejoramiento continuo en todas sus áreas para que se asegure el aumento de los indicadores de confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad, mejorar la eficacia de las rutinas, planes, estrategias de mantenimiento y demás estrategias encaminadas a mitigar pérdidas o diferidas de producción, cumplir con las expectativas de producción y el desempeño de los sistemas, salvaguardando la integridad del recurso humano, las comunidades de las áreas de influencia, preservando los equipos, activos e inmuebles y reduciendo el impactos medio ambiental. El diagnóstico no acertado conlleva a mantenimientos innecesarios, demoras en los tiempos de respuesta, mantenimientos no enfocados a la causa raíz, ocasionando sobre costos por re-procesos, tiempos muertos de producción y pueden llegar convertirse en pérdida total de activos, altas perdidas económicas, afectaciones graves a la imagen de la empresa, accidentes laborales, muertes y desastres ambientales. Mediante el modelado del sistema de compresión de gas, se propone un análisis de Weibull triparámetro a cada componente del sistema de compresión de gas de la estación Lizama, el cual obtendrá la confiabilidad de cada unidad compresora y se relacionará con la confiabilidad global de todo el sistema acorde con la interconexión de sus partes. Todo esto con el fin de evidenciar la confiabilidad y sus características en todo el sistema.

*Proyecto de Grado

**Ingeniero Electricista - Universidad Industrial de Santander

***Ingeniero Electrónico - Fundación Universidad Autónoma de Colombia

****Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica Especialización de Gerencia de Mantenimiento. Director Daniel Plata Ortiz

Abstract

TITLE: THREE PARAMETER WEIBULL ANALYSIS APPLIED TO THE GAS COMPRESSION SYSTEM OF ECOPETROL S.A. LIZAMA STATION *

AUTHORS: CARLOS ANTONIO ORTIZ MACHUCA **

VICENTE JAVIER SOLANO RODRÍGUEZ *****

KEY WORDS: Weibull analysis , Reliability , gas compression system .

DESCRIPTION:

The mining-energy and petrochemical sector is aimed at continuous improvement in all its areas to ensure the increase of indicators of reliability, availability, maintainability, improve the efficiency of routines, plans, maintenance strategies and other strategies aimed at mitigating Losses or deferred production, meeting production expectations and systems performance, safeguarding the integrity of the human resource, communities in the areas of influence, preserving equipment, assets and real estate and reducing environmental impacts. Unsatisfactory diagnosis leads to unnecessary maintenance, delays in response times, maintenance not focused on the root cause, resulting in costs for re-processes, downtime and can become total loss of assets, high economic losses, Serious damage to the company image, industrial accidents, deaths and environmental disasters. By means of the gas compression system modeling, a Weibull triparameter analysis is proposed to each component of the gas compression system of the Lizama station, which will obtain the reliability of each compressor unit and relate to the overall reliability of the whole System according to the interconnection of its parts. All this in order to evidence the reliability and its characteristics throughout the system.

* Graduation project

** Electrical Engineer- Universidad Industrial de Santander

*** Electronic Engineer- Fundación Universidad Autónoma de Colombia

**** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering Specialization of Maintenance Management. Director Daniel Plata Ortiz

Índice general

Introducción	1
1. Descripción del proyecto	2
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2. OBJETIVOS	4
2. Soporte documental	5
2.1. MARCO TEÓRICO:	5
2.2. MARCO LEGAL:	16
2.3. MARCO ORGANIZACIONAL	18
2.4. PROCESO DE COMPRESIÓN	20
3. Modelado del sistema de compresión de gas estación Lizama de Ecopetrol S.A	24
3.1. Descripción Modelado Sistema Compresión Gas Lizama	24
3.2. Descripción de operación del modelo:	25
3.3. Descripción de Fronteras y Fase de Compresión:	26
4. Confiabilidad operativa de los componentes del sistema de compresión de gas utilizando la distribución Weibull triparámetro.	33
4.1. Ordenar Información:	33
4.2. Determinar TTF, TTR y TBF	34
4.3. Preparando los datos para aplicar Weibull	34
4.4. Análisis de Weibull Triparámetro	36
4.5. Confiabilidad y tiempos medios de operación por Unidad Compresora	39
5. MTBF del sistema modelado utilizando la distribución Weibull triparámetro para sistemas serie-paralelo.	41

5.1. Calcular MTBF del sistema utilizando el método convencional:	41
5.2. Evaluar el Modelo de Confiabilidad	43
5.3. Confiabilidad Sistema Modelado Distribución Exponencial	45
5.4. Análisis de Weibull Sistema Modelado	49
5.5. Comparación MTBF, Confiabilidad Exponencial y Confiabilidad Weibull . . .	53
6. Conclusiones y recomendaciones	55
6.1. Conclusiones	55
6.2. Trabajos futuros	56

Índice de figuras

Figura 1. F(t) Vs Tiempos de Falla (horas). Fuente: WeibulleIM	13
Figura 2. Resultados WeibulleIM. Fuente: WeibulleIM	13
Figura 3. Confiabilidad vs Tiempo (Horas). Fuente: Autor	14
Figura 4. Probabilidad de Falla vs Tiempo (Horas). Fuente Autor	14
Figura 5. Densidad de Probabilidad de Falla vs Tiempo (Horas). Fuente: Autor . .	15
Figura 6. Tasa de Falla vs Tiempo (Horas). Fuente: Autor	15
Figura 7. Ubicación Lisama. Fuente: Ecopetrol S.A	20
Figura 8. Esquema general máquina K6 Lisama. Fuente: Confipetrol	22
Figura 9. Ventana operativa de cada unidad compresora. Fuente: Autor.	23
Figura 10. Modelado Sistema de compresión de Gas Estación Lisama. Fuente Autor	25
Figura 11. Ruta de gas compresora Lisama. Fuente Autor.	30
Figura 12. Propiedades del gas rico de Lisama y el gas seco del centro. Fuente: Manual de Operación Man	32
Figura 13. Regresión Lineal con Localización en cero. Fuente Autor	36
Figura 14. Interfase Solver Aplicativo Excel. Fuente Excel	37
Figura 15. Datos Aproximación Regresión Unidad 3 Lis. Fuente: Autor.	37
Figura 16. Regresión Lineal Unidad Compresora 3. Fuente Autor	38

Figura 17.	Confiabilidad de la Unidad 3 Lis. Fuente Autor	39
Figura 18.	Confiabilidad de la Unidad 4 Lis. Fuente Autor	40
Figura 19.	Confiabilidad de la Unidad 5 Lis. Fuente Autor	40
Figura 20.	Confiabilidad de la Unidad 6 Lis. Fuente Autor	40
Figura 21.	Confiabilidad de la Unidad 7 Lis. Fuente Autor	40
Figura 22.	Confiabilidades Exponenciales del Sistema. Fuente Autor	47
Figura 23.	Regresión Exponencial Sistema Modelado. Fuente Autor	48
Figura 24.	Confiabilidades Weibull del Sistema. Fuente Autor	51
Figura 25.	Aproximación Regresión Sistema Modelado. Fuente Autor	52
Figura 26.	Confiabilidades del Sistema. Fuente Autor	53
Figura 27.	Diferencia Absoluta en las distribuciones Exponencial y Weibull respecto el valor de referencia. Fuente Autor	54

Índice de tablas

Tabla 1.	Datos Tiempos a Fallar o TTF Equipo. Fuente: Autor	12
Tabla 2.	Tabla de Datos Organizados Ascendentemente. Fuente: Autor	12
Tabla 3.	Distribución Rango Mediana. Fuente: Autor	12
Tabla 4.	Componentes Regresión Lineal. Fuente: Autor	12
Tabla 5.	Formato de Registro de Tiempos. Fuente: Confipetrol	33
Tabla 6.	Formato de Registro Modificado. Fuente: Autor	34
Tabla 7.	Filtro de Fallas Unidad 3 Lis. Fuente: Autor.	35
Tabla 8.	Tiempos Medios de Operación. Fuente Autor	35
Tabla 9.	Fallas Registradas en la Unidad 3 Lis. Fuente: Autor.	35
Tabla 10.	Regresión Lineal Localización en cero. Fuente Autor	36
Tabla 11.	Tiempos de Operación de cada componente	39
Tabla 12.	Tiempos a Fallar de las Unidades del Sistema. Fuente Autor	42
Tabla 13.	Tiempos Medios entre fallas, reparación y a fallar del sistema Fuente Autor	42

Tabla 14. Tiempos de Operación, Reparación y entre fallas Sistema Equivalente. Fuente Autor	43
Tabla 15. Confiabilidad Promedio Componentes del Sistema Método Convencional. Fuente Autor	44
Tabla 16. Confiabilidad Equivalente Método Convencional. Fuente Autor	44
Tabla 17. Confiabilidad Promedio Componentes del Sistema utilizando Weibull. Fuente Autor	44
Tabla 18. Confiabilidad Equivalente Utilizando Weibull. Fuente Autor	45
Tabla 19. Parámetros distribución Exponencial. Fuente Autor	45
Tabla 20. Confiabilidad en el tiempo para cada Componente Distribución Exponencial. Fuente Autor	46
Tabla 21. Modelo Aplicado a primeras 24 horas Distribución Exponencial. Fuente Autor	47
Tabla 22. MTBF y Tasa de Fallos de la Confiabilidad Equivalente Distribución Exponencial. Fuente Autor	48
Tabla 23. Parámetros Weibull para cada Componente del Sistema. Fuente Autor	49
Tabla 24. Confiabilidad en el tiempo para cada Componente Distribución Weibull. Fuente Autor	49
Tabla 25. Modelo Aplicado a primeras 24 horas. Fuente Autor	50
Tabla 26. MTBF y Parámetros Weibull Sistema Modelado. Fuente Autor	51
Tabla 27. Regresión Weibull Sistema Modelado. Fuente Autor	52

Introducción

La gestión de activos ha sido un pilar en la industria petrolera, llevándola a la mejora continua de la disponibilidad y producción, mitigando costos de mantenimientos no previstos, fallas operacionales y consecuencias nefastas en los activos, las personas y el medio ambiente. Debido a esto el sector siempre esta incursionando en nuevas formas de mejorar sus indicadores, identificar factores de riesgo, mejorar los tiempos de respuesta y reducir las diferidas de producción.

En el presente proyecto se pretende realizar una aplicación de la distribución Weibull triparámetro al sistema de compresión de gas de la estación Lizama de Ecopetrol, el cual se llevará a cabo modelando su confiabilidad global a partir de los análisis individuales de cada componente del sistema de compresión de gas, dichos análisis se realizarán incluyendo en las predicciones el factor de localización de la distribución Weibull, el cual aumenta la correlación de la regresión lineal utilizada y por ende mejora la predicción de tiempos de falla, vida característica, confiabilidad, probabilidad de falla y tasa de fallos Örkücü, Aksoy, and Doga (2015).

Para el correcto análisis de los componentes del sistema se utilizan datos de tiempos de falla almacenados en el sistema de gestión de activos Eclipse. Estos datos se vienen almacenando desde mucho tiempo atrás, lo cual nos proporciona una gran variedad de datos como son la fecha, hora y localización de las fallas. Para un adecuado modelado del sistema se organizan dichos datos según su interrelación y relevancia en el sistema. Como resultado final se obtendrán los tiempos medios de falla del sistema modelado, vitales para la planeación, coordinación y ejecución del mantenimientos y la operación de la estación Lizama. Además, el análisis de Weibull permite estimar características importantes para el sistema como lo son la vida característica, confiabilidad, probabilidad de falla y tasa de fallos equivalentes para el sistema modelado.

La estimación de los tiempos medios entre fallas a través de la aplicación del análisis de Weibull triparámetro permitirá ajustar los tiempos de inspección de los equipos, ajustar las rutinas de mantenimiento, planes de mantenimiento, mejorar las predicciones futuras entre otras posibles aplicaciones.

Capítulo 1

Descripción del proyecto

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años la industria del petróleo, petroquímica y gas natural, ha venido utilizando técnicas para la extracción, separación y tratamiento de gas natural, esto con el fin de extraer los productos blancos del gas natural, mediante el tratamiento que se aplica al gas en diferentes etapas. Es de vital importancia transportar grandes volúmenes de gas a plantas de proceso, por ende se ha implementado el transporte de gas natural, mediante varias estaciones de compresión, que cumplen una importante función en esta área, ya que son las encargadas de comprimir grandes volúmenes de este producto por medio de una o varias unidades compresoras de gas. Estos equipos reciben volúmenes pequeños de gas a muy baja presión, los comprimen mediante tres etapas diferentes, cada etapa empaqueta el producto secuencialmente aumentando la presión de gas por etapa hasta llegar al volumen y presión requeridos para el transporte. En el trabajo de grado realizado por la ingeniera química Karol Quintero, enuncia que “El gas Lizama viene a una presión natural de 750 psi (5171.068 kPa) y un flujo entre 10 y 12 millones de ft^3 (283.168,466 y 339.802,159 m^3)” Quintero (2010).

Para asegurar la producción, alta confiabilidad y operatividad de la estación se han venido implementado: planes de mantenimiento, rutinas de mantenimiento, mantenimientos preventivos, predictivos como análisis de termografía, vibraciones, alineación y en última instancia mantenimiento correctivos. En el estudio de 2011 realizado por Hernando Vera evidencia que “durante el año 2009 las estaciones compresoras de los campos Lizama, Llanito, El Centro, Suerte, Bonanza y Santos generaron un tiempo total de paradas correctivas de 7.389,5 horas, correspondiente a 24 paradas en el año, las cuales causaron \$183.207.800 en costos de mantenimiento” Vera (2011) La falta de implementación de técnicas de confiabilidad mas asertivas, que mejoren los actuales

planes de mantenimiento aplicados a los sistemas, han arrojado diagnósticos no acertados que conllevan a mantenimientos innecesarios, no enfocados a la causa raíz de la falla, ocasionando sobre costos, tiempos muertos de producción y pueden llegar a convertirse en pérdida total de activos, accidentes laborales, muertes y desastres ambientales.

Por lo tanto, es necesario el continuo mejoramiento de los planes de mantenimiento, rutinas, procesos e indicadores que requieren técnicas predictivas tales como el análisis de Weibull tri-parámetro, el cual está enfocado en sistemas de alta confiabilidad, mejora la predicción de tiempos medios entre fallas, vida característica, tasa de fallos, probabilidad de falla y confiabilidad; dichos indicadores mejoran el desempeño de los procesos productivos reajustando los tiempos de inspección de los equipos disminuyendo los costos por reparaciones previstas y no previstas.

El estado actual del sector petrolero no admite errores, pérdidas o sobrecostos, los cuales impacten la producción, contaminación al medio ambiente, disminución del rubro de las regalías y otros gravámenes. Todos estos factores ocurren debido a la falta de innovación en la aplicación de técnicas de confiabilidad que mejoren los actuales planes de mantenimiento enfocados a los sistemas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivos Generales:

Determinar el tiempo de desfase entre el MTBF del análisis Weibull triparámetro y el MTBF del sistema de compresión de gas de la estación Lizama de Ecopetrol S.A

1.2.2. Objetivos Específicos:

1. Modelar y describir la participación de cada componente del sistema de compresión de gas
2. Determinar la confiabilidad operativa de los componentes del sistema de compresión de gas utilizando la distribución Weibull triparámetro
3. Determinar el tiempo medio entre fallas del sistema modelado utilizando la distribución Weibull triparámetro para sistemas serie-paralelo.

Capítulo 2

Soporte documental

2.1. MARCO TEÓRICO:

2.1.1. Confiabilidad Distribución Exponencial

Es la distribución estadística más ampliamente usada en los trabajos de confiabilidad, mantenibilidad y mantenimiento, debido a su fácil manejo y la tasa de fallos constante que muchos activos de ingeniería poseen. La confiabilidad para un sistema dado donde se conoce el tiempo medio entre fallas o la tasa de fallos esta dado por Dhillon (2006):

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.1)$$

Donde:

λ es la tasa de fallos, para una tasa de fallos constante y está dada por:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \text{ Birolini (2006)}$$

$$MTBF = \frac{\sum_i^N (Tof f_i + Ton_i)}{N} \quad (2.2)$$

$$MTTF = \frac{\sum_i^N (Ton_i)}{N} \quad (2.3)$$

$$MTTR = \frac{\sum_i^N (Tof f_i)}{N} \quad (2.4)$$

Siendo Ton_i el tiempo operativo entre la falla i e $i + 1$, $Tof f_i$ el tiempo de reparación entre la falla i e $i + 1$ y N el número total de fallas.

2.1.2. Modelado de Confiabilidad:

El modelado de confiabilidad involucra la selección del modelo, estimación de parámetros y validación. En las etapas iniciales de los análisis de confiabilidad, el proceso de modelado comienza con un modelo cualitativo, por ejemplo, un diagrama de bloques que muestre la estructura del producto como sistema. Este exhibe las partes y componentes del sistema y sus interconexiones, y puede ser realizado a varios niveles de complejidad y detalle. Los diagramas de bloques pueden ser pensados como diagramas de flujo indicando los caminos en los cuales el sistema es operacional si todos sus componentes son operacionales. La estructura lógica es representada por arreglos de bloques en serie, paralelo, una combinación de estos dos o patrones más complejos. El siguiente paso del proceso es asignar probabilidades de operación exitosa a los bloques del diagrama. La confiabilidad del sistema es entonces calculada usando el modelo lógico estructural. La evaluación de dichas probabilidades es uno de los aspectos más importantes del análisis de confiabilidad. Esto se realiza de varias maneras, dependiendo del estado del ciclo de vida del producto y la información disponible Blischke (2003).

2.1.3. Redes de Confiabilidad:

Los sistemas pueden adoptar varias formas o configuraciones en los análisis de confiabilidad. A continuación se muestran algunas de las configuraciones más comunes, entre las que podemos destacar los sistemas serie, paralelo y las redes M-Fuera-de-N o sistemas redundantes.

2.1.3.1. Confiabilidad de un Sistema Paralelo:

Los sistemas en paralelo mejoran la confiabilidad del sistema respaldando las componentes en servicio con componentes en espera, la confiabilidad de dichos sistemas se puede expresar de la siguiente forma:

Considere un sistema S con n componentes de $1, 2, \dots, n$ conectados en paralelo, cada uno posee una confiabilidad r_i . Benkamra, Terbeche, and Tlemcan (2013)

La confiabilidad del sistema R_p es:

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - r_i)$$

2.1.3.2. Confiabilidad de un Sistema Serie:

La confiabilidad de los sistemas en serie se asemeja a una cadena, donde el elemento con menos confiabilidad impacta en mayor medida la confiabilidad total del sistema. La confiabilidad de dichos sistemas se puede expresar de la siguiente forma:

Considere un sistema S con n componentes de $1, 2, \dots, n$ conectados en paralelo, cada uno posee una confiabilidad r_i . Benkamra et al. (2013)

La confiabilidad del sistema R_s es:

$$R_s = \prod_{i=1}^n r_i$$

2.1.3.3. Confiabilidad en Sistemas M-Out-of-N

Para los sistemas compuestos de n unidades activas y que al menos m unidades deben operar normalmente para que el sistema sea exitoso. Los sistemas serie paralelo son casos especiales de este sistema, siendo $m = n$ para el sistema serie y $m = 1$ para el sistema paralelo, para componentes independientes e idénticos la confiabilidad de este sistema se puede expresar de la siguiente forma: Dhillon (2006)

$$R_{m/n} = \sum_{j=m}^n \binom{n}{j} R^j (1-R)^{n-j} \quad (2.5)$$

Donde:

$$\binom{n}{j} = \frac{n!}{(n-j)!j!}$$

Donde R es la confiabilidad de un componente.

2.1.4. Análisis de Weibull Triparámetro.

El análisis de Weibull es una herramienta probabilista propuesta por el ingeniero suizo Waloddi Weibull, que nos permite estimar la vida media de un equipo, la tasa de fallas, tiempos medios entre fallas y además identificar el tipo de gestión de mantenimiento adecuado para cada equipo. La mutabilidad de dicha función se basa en las diferentes formas que adopta dependiendo de

los valores que toman sus parámetros. De acuerdo al número de parámetros que se tenga en cuenta en un análisis específico, se denomina análisis de Weibull biparámetro al implementar solo los parámetros de forma y escala. Cuando se incorpora al análisis el parámetros localización se le denomina análisis de Weibull triparámetro, el cual se caracteriza por disminuir el error estadístico.

Es bien sabido que la distribución de Weibull triparámetro es extremadamente flexible y que se puede ajustar muy bien a un amplio rango de observaciones empíricas Nosal, Legge, and Krupa (2000), es la base del MLE o Estimación de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood Estimation). Físicamente, los valores límite de la función de Weibull están relacionados con la vida útil de los productos en estudio, y han generado iniciativas de perfeccionamiento en el campo de la calidad, mejora continua, o de cero fallas entre otros Moreno, Aguilar, Hernández, and Soto (2013). El estudio de matemáticas aplicadas y computación del Dr Hasan Örkücü de la Gazi University de Ankara, Turquía, concluye que es posible usar el Weibull triparámetro en el modelamiento acertado de problemas de la vida real en los cuales el modelo biparámetro resulta insuficiente. Örkücü et al. (2015)

La distribución de Weibull es usada en un amplio rango de problemas, es de lejos el modelo estadístico más popular en el mundo para analizar ciclo de vida. También es usado en muchas otras aplicaciones como el pronóstico del clima, y ajuste de data de todo tipo. Puede ser usado en análisis de ingeniería con menor número de muestras que otras distribuciones estadísticas Elmahdy (2015).

El método más popularizado para estimar los parámetros de la distribución de Weibull es el de los mínimos cuadrados, el cual calcula los parámetros de forma y escala, mediante la aproximación de la recta en la escala logarítmica de la función de distribución acumulativa Palacio (2015).

2.1.4.1. Deducción de la ecuación lineal de regresión:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta}, \text{ Función acumulativa de Weibull}$$

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

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

$$\Rightarrow \ln \left[\frac{1}{1-F(t)} \right] = \ln \left[e^{\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta} \right]$$

$$\Rightarrow \ln \left[\frac{1}{1-F(t)} \right] = \left(\frac{t-\delta}{\eta} \right)^\beta$$

$$\Rightarrow \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right] = \beta \ln \left(\frac{t-\delta}{\eta} \right).$$

$$\therefore \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right] = \beta \ln(t - \delta) - \beta \ln(\eta), (*)$$

La expresión (*) representa la ecuación de la recta

$$y = \beta * x + b, (**)$$

La cual es la recta de regresión con:

$$y = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right]; x = \ln(t - \delta); b = -\beta \ln(\eta) (***)$$

Donde β , es la pendiente de la recta de regresión.

El parámetro de escala, η , está en función del cruce con el eje x y del parámetro de forma; por lo tanto:

$$b = -\beta \ln(\eta)$$

$$-\frac{b}{\beta} = \ln(\eta)$$

$$\therefore \eta = e^{-\frac{b}{\beta}} \text{ Palacio (2015)}$$

2.1.4.2. Combinación de parámetros de Weibull:

En el Análisis de Weibull pueden ocurrir diferentes combinaciones de parámetros los cuales describen diferentes mecanismos de falla:

1. $\delta = 0$, el objeto de estudio no tiene una duración de fiabilidad intrínseca, y
 - si $\beta < 1$ la tasa de fallos disminuye con la edad de manera asintótica, se considera al componente en juventud o mortalidad infantil, con un margen de seguridad bajo, dando lugar a fallos por tensión de rotura.
 - si $\beta = 1$ la tasa de fallo se mantiene constante, indica una característica de fallos aleatoria o pseudo-aleatoria.
 - si $\beta > 1$ la tasa de fallo se incrementa con la edad de forma contante, indica que los desgastes empiezan en el momento en que el mecanismo se pone en servicio.
2. $\delta > 0$: El objeto de estudio es intrínsecamente fiable desde el momento en que fue puesto en servicio hasta que $t = \delta$, y además:

- si $\beta < 1$ hay desgaste, la tasa de fallo disminuye con el tiempo después de un súbito incremento hasta δ ; valores de β bajos ($\sim 0,5$) pueden asociarse con ciclos de desgaste bajos y los valores de β más elevados ($\sim 0,8$) con ciclos más altos.
 - si $\beta > 1$ hay una erosión o desgaste similar en la que la constante de duración de carga disminuye proporcionalmente con el incremento de la carga.
3. $\delta < 0$. Indica que el objeto de estudio fue utilizado o tuvo fallos antes de iniciar el periodo de observacion, de otro modo Kececioglu (2002)
- si $\beta < 1$ podría tratarse de un fallo de mortalidad infantil antes de su puesta en servicio, como resultado de un margen de seguridad bajo.
 - si $\beta > 1$ se asocia a un desgaste por una disminución constante de la resistencia iniciado antes de su puesta en servicio, por ejemplo debido a una vida propia limitada que ha terminado. del Pino (1994)

2.1.4.3. Rango Mediana

El primer paso para realizar el análisis de Weibull es organizar los datos de tiempos de falla en orden ascendente para poder calcular el rango mediana el cual es una distribución probabilista no paramétrico basado en el orden de las fallas, dicho rango mediana se expresa por la siguiente expresión:

$$w_{\alpha}(x_i) = \frac{\frac{i}{n-i+1}}{F_{1-\alpha, 2(n-i+1), 2i + \frac{i}{n-i+1}}} \quad (2.6)$$

Donde:

$w_{\alpha}(x_i)$: rango de mediana para un nivel de confianza $(1-\alpha)$,

α : es el nivel de significancia y toma el valor de 0,5.

i : orden de la falla.

n : número total de datos de la muestra.

$F_{1-\alpha, 2(n-i+1), 2i}$: valor crítico de la distribución F, evaluada en el nivel de significancia α y con grados de libertad $v_1 = 2 * (n - i + 1)$ y $v_2 = 2 * i$, se calcula con la función de Excel «DISTR.F.INV()»

Debido a la complejidad de la ecuación 2.6 usualmente se usa la ecuación de Bernard, la cual es una aproximación exacta dentro de 0.005 Dodson (2006).

$$Rm(x_i) = \frac{i + 0,3}{n + 0,4}$$

Donde:

$RM(x_i)$: Rango de mediana.

i : Orden de la falla.

n : Número total de datos de la muestra.

2.1.4.4. Weibull triparámetro aplicado en un ejemplo

Cálculo de parámetros forma y escala por regresión lineal Para llevar a la práctica Weibull tomaremos como ejemplo datos representados en la tabla 1, dichos tiempos se ordenan ascendentemente y se en listan a continuación:

Suponiendo que $\delta = 0$, se utiliza la ecuación 2.6 en los datos de la tabla 2, se calculan todos los rangos mediana y se evalúan las componentes de la regresión lineal (tabla 3) que posteriormente se graficarán en la Figura 1.

Calculando la pendiente de recta encontramos que $\beta = 5,202$, lo cual indica que se presenta un deterioro temprano y la tasa de fallas se incrementará con el tiempo, utilizando la ecuación 2.1.4.1 y se encuentra que la vida característica de la máquina es $\eta = 61,65$ horas, para una coeficiente de correlación de datos $R^2 = 0,9701$.

Utilizando el Programa «WeibulleIM», introducimos los tiempos de falla y calculamos por el método (RRX - Rank Regression on X) RHW (2007) el cual toma $\delta = 0$, los resultados del programa son $\beta = 5,35296$ y $\eta = 61,4603$ horas para un coeficiente de correlación $R^2 = 0,9701$. Por lo cual se puede decir que la predicción del modelo descrito anteriormente es igualmente preciso.

i	TTF (Horas)	i	TTF (Horas)
1	61.00	41	59.00
2	50.00	42	49.00
3	62.00	43	64.00
4	47.00	44	55.00
5	64.00	45	48.00
6	40.00	46	61.00
7	76.00	47	47.00
8	38.00	48	58.00
9	75.00	49	46.00
10	41.00	50	58.00
11	74.00	51	57.00
12	47.00	52	52.00
13	72.00	53	62.00
14	47.00	54	46.00
15	62.00	55	72.00
16	57.00	56	37.00
17	56.00	57	71.00
18	53.00	58	33.00
19	58.00	59	71.00
20	61.00	60	47.00
21	50.00	61	57.00
22	69.00	62	56.00
23	53.00	63	53.00
24	57.00	64	55.00
25	52.00	65	55.00
26	66.00	66	66.00
27	47.00	67	49.00
28	67.00	68	57.00
29	51.00	69	50.00
30	57.00	70	68.00
31	55.00	71	42.00
32	64.00	72	77.00
33	48.00	73	30.00
34	65.00	74	88.00
35	52.00	75	37.00
36	65.00	76	88.00
37	47.00	77	32.00
38	68.00	78	90.00
39	48.00	79	31.00
40	61.00	80	85.00

Tabla 1: Datos Tiempos a Fallar o TTF Equipo. Fuente: Autor

i	TTF	i	TTF	i	TTF	i	TTF
1	30	21	48	41	57	61	65
2	31	22	48	42	57	62	65
3	32	23	49	43	57	63	66
4	33	24	49	44	57	64	66
5	37	25	50	45	57	65	67
6	37	26	50	46	57	66	68
7	38	27	50	47	58	67	68
8	40	28	51	48	58	68	69
9	41	29	52	49	58	69	71
10	42	30	52	50	59	70	71
11	46	31	52	51	61	71	72
12	46	32	53	52	61	72	72
13	47	33	53	53	61	73	74
14	47	34	53	54	61	74	75
15	47	35	55	55	62	75	76
16	47	36	55	56	62	76	77
17	47	37	55	57	62	77	85
18	47	38	55	58	64	78	88
19	47	39	56	59	64	79	88
20	48	40	56	60	64	80	90

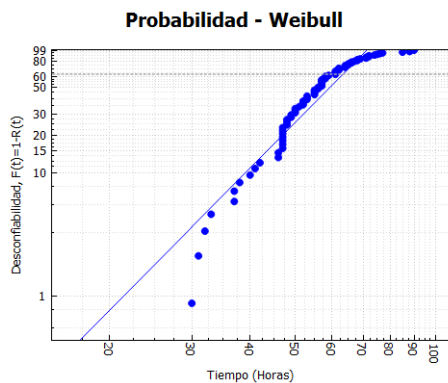
Tabla 2: Tabla de Datos Organizados Ascendentemente. Fuente: Autor

i	TTF	Rango Mediana	i	TTF	Rango Mediana
1	30	0.863%	41	57	50.622%
2	31	2.089%	42	57	51.867%
3	32	3.329%	43	57	53.112%
4	33	4.571%	44	57	54.357%
5	37	5.814%	45	57	55.602%
6	37	7.058%	46	57	56.846%
7	38	8.302%	47	58	58.091%
8	40	9.547%	48	58	59.336%
9	41	10.791%	49	58	60.581%
10	42	12.036%	50	59	61.825%
11	46	13.280%	51	61	63.070%
12	46	14.525%	52	61	64.315%
13	47	15.769%	53	61	65.560%
14	47	17.014%	54	61	66.804%
15	47	18.259%	55	62	68.049%
16	47	19.503%	56	62	69.294%
17	47	20.748%	57	62	70.539%
18	47	21.993%	58	64	71.784%
19	47	23.238%	59	64	73.028%
20	48	24.482%	60	64	74.273%
21	48	25.727%	61	65	75.518%
22	48	26.972%	62	65	76.762%
23	49	28.216%	63	66	78.007%
24	49	29.461%	64	66	79.252%
25	50	30.706%	65	67	80.497%
26	50	31.951%	66	68	81.741%
27	50	33.196%	67	68	82.986%
28	51	34.440%	68	69	84.231%
29	52	35.685%	69	71	85.475%
30	52	36.930%	70	71	86.720%
31	52	38.175%	71	72	87.964%
32	53	39.419%	72	72	89.209%
33	53	40.664%	73	74	90.453%
34	53	41.909%	74	75	91.698%
35	55	43.154%	75	76	92.942%
36	55	44.398%	76	77	94.186%
37	55	45.643%	77	85	95.429%
38	55	46.888%	78	88	96.671%
39	56	48.133%	79	88	97.911%
40	56	49.378%	80	90	99.137%

Tabla 3: Distribución Rango Mediana. Fuente: Autor

X=Ln(t)	Y=Ln(-Ln(1-F(t)))	X=Ln(t)	Y=Ln(-Ln(1-F(t)))
2.43089175	-4.75	3.64725026	-0.35
2.51519463	-3.86	3.64725026	-0.31
2.59293978	-3.39	3.64725026	-0.28
2.66507422	-3.06	3.64725026	-0.24
2.91066533	-2.82	3.64725026	-0.21
2.91066533	-2.61	3.64725026	-0.17
2.96367467	-2.45	3.67297911	-0.14
3.06194202	-2.30	3.67297911	-0.11
3.10767678	-2.17	3.67297911	-0.07
3.15141104	-2.05	3.69806256	-0.04
3.30941157	-1.95	3.74641734	0.00
3.30941157	-1.85	3.74641734	0.03
3.34529756	-1.76	3.74641734	0.06
3.34529756	-1.68	3.74641734	0.10
3.34529756	-1.60	3.76974527	0.13
3.34529756	-1.53	3.76974527	0.17
3.34529756	-1.46	3.76974527	0.20
3.34529756	-1.39	3.8148294	0.24
3.34529756	-1.33	3.8148294	0.27
3.37994024	-1.27	3.8148294	0.31
3.37994024	-1.21	3.83663148	0.34
3.37994024	-1.16	3.83663148	0.38
3.41342288	-1.10	3.85796834	0.42
3.41342288	-1.05	3.85796834	0.45
3.44582065	-1.00	3.87885944	0.49
3.44582065	-0.95	3.89932302	0.53
3.44582065	-0.91	3.89932302	0.57
3.47720167	-0.86	3.91937622	0.61
3.5076278	-0.82	3.95831512	0.66
3.5076278	-0.77	3.95831512	0.70
3.5076278	-0.73	3.97723035	0.75
3.53715546	-0.69	3.97723035	0.80
3.53715546	-0.65	4.01402016	0.85
3.53715546	-0.61	4.03191964	0.91
3.5937172	-0.57	4.04950437	0.97
3.5937172	-0.53	4.0667852	1.05
3.5937172	-0.49	4.19523032	1.13
3.5937172	-0.46	4.23944031	1.22
3.62084191	-0.42	4.23944031	1.35
3.62084191	-0.38	4.26786382	1.56

Tabla 4: Componentes Regresión Lineal. Fuente: Autor



Informe de Resultados

Usuario : Equipo Ejemplo

ID :

Fecha : 26/02/2016

Tipo de Distribución : Weibull 2P

Tipo de Análisis : RRX

Parametros

Beta : 5.35296

Eta : 61.4603

Rho: 0.9701

Figura 1: F(t) Vs Tiempos de Falla (horas).
Fuente: WeibulleIM

Figura 2: Resultados WeibulleIM. Fuente:
WeibulleIM

Cálculo de parámetro localización El parámetro δ indica en el tiempo, el momento a partir del cual se genera una distribución y se calcula por medio de estimación, siguiendo los siguientes pasos:

1. Se irán dando valores a δ y se iterará volviendo a calcular los parámetros de la regresión lineal, donde x es el vector de los datos de la muestra

$$t'_i = t_i - \delta$$

2. Se calculan los valores de los ejes de las abscisa y las ordenadas siendo

$$X' = \ln(t'_i)$$

$$Y = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t_i)} \right) \right]$$

3. Se calcula la regresión lineal por mínimos cuadrados.
4. Se calcula el coeficiente R^2 de la recta.
5. Se grafica δ vs R^2
6. La solución será cuando el valor R^2 llegue al máximo, utilizando el complemento solver de excel se itera hasta llegar a la solución.
7. Como resultado $\delta = 18,63098$ horas. Lo cual indica que las fallas solo empezaran a ocurrir después del tiempo δ . Rel

8. Con este valor se recalcula $\beta = 3,2454$ y $\eta = 42,60$ horas, para un coeficiente de correlación máximo de $R^2 = 0,9821$ López (2012)

Cálculo de Tiempo medio entre fallas Teniendo la vida característica η , el factor de escala β y el factor de localización δ es posible hallar parámetros como el tiempo medio de fallas ligado con la confiabilidad de los equipos.

$$MTBF = \delta + \mu * \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) = \frac{\sum_{i=1}^n T_{Bi}}{n}$$

Donde Γ representa la función Gamma. Siendo $\beta = 3,2454$ y $\eta = 42,60$ entonces $MTBF = 56,8122$ horas con una probabilidad de Falla de 50.39 %.

Ya que datos presentan alto grado de distorsión se procede a calcular la desviación estándar y error estándar:

$$\sigma_{ST} = \eta * \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)}$$

$$E_{MTBF} = \frac{\sigma_{ST}}{\sqrt{n}}$$

Donde n representa el número total de datos de la muestra

Donde Γ representa la función Gamma. Siendo $\beta = 3,2454$, $\eta = 42,60$, $\sigma_{ST} = 12,931$ y $E_{MTBF} = 1,44$ entonces $MTBF = 56,8122 \pm 1,44$ horas con una probabilidad de Falla de $50,39 \pm 8,47$ %.

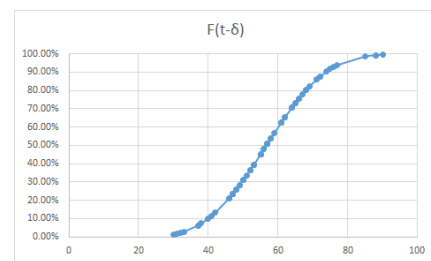
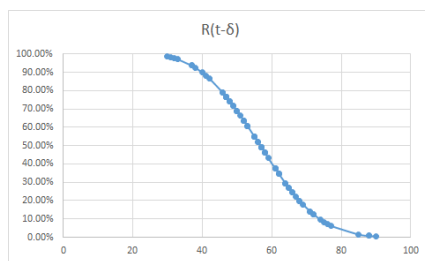


Figura 3: Confiabilidad vs Tiempo (Horas). Fuente: Autor

Figura 4: Probabilidad de Falla vs Tiempo (Horas). Fuente Autor

Se grafica la confiabilidad en función del tiempo:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.7)$$

Se grafica la Probabilidad de Falla en función del Tiempo:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.8)$$

Se grafica la Densidad de Probabilidad de Falla en función del tiempo:

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

Se grafica la Tasa de Fallas en función del tiempo:

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

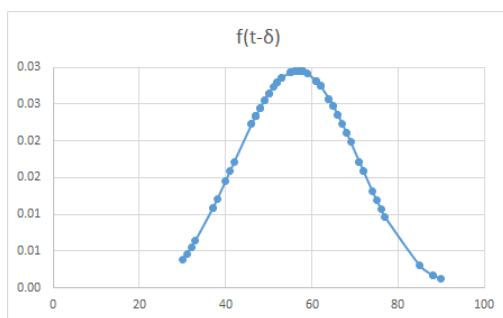


Figura 5: Densidad de Probabilidad de Falla vs Tiempo (Horas). Fuente: Autor

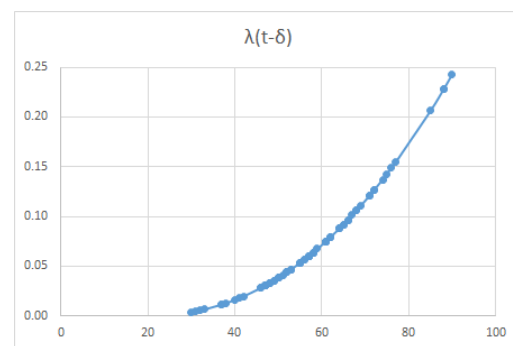


Figura 6: Tasa de Falla vs Tiempo (Horas). Fuente: Autor

2.2. MARCO LEGAL:

En el marco legal y normativo se debe tener en cuenta tanto la PAS 55:2008, ISO 55001:2014, ISO 55002:2014 de gestión de activos, la ISO 14224 la cual normaliza la recolección e intercambio de datos de equipos para el sector petrolero, petroquímico y de gas natural, la ISO 9001 de sistemas de gestión de calidad, la ISO 14001 de sistemas de gestión ambiental entre otras normas referenciadas en el Marco Normativo de Referencia para la Certificación de Gestores en Mantenimiento y Confiabilidad – ACIEM.ACI

A continuación se da una breve descripción de los referentes más importantes:

2.2.1. PAS 55:2008:

Estándar Británico que define las buenas prácticas durante todo el ciclo de vida y gestión optimizada de activos físicos, es una serie de 28 requerimientos de gestión de activos con las siguientes características:

- Es aplicable a todo sector industrial o de servicios dependiente de activos físicos o de infraestructura.
- Gestión de Activos no es prescriptiva, es decir no recomienda ninguna práctica en particular.
- Gestión de Activos no es un tema solo de mantenimiento, ingeniería o de operación de los activos, en realidad se trata de una disciplina que integra estos tres pilares bajo el mismo enfoque.
- Gestión de Activos no trata de minimizar costos, riesgos o maximizar el desempeño, se debe considerar de manera óptima el costo, riesgo y desempeño.
- Se debe considerar todo el ciclo de vida, partiendo desde la concepción de los activos hasta su desincorporación/renovación, pasando por las diferentes etapas de ingeniería, operación y mantenimiento. Durán (2011)

2.2.2. ISO 55001:2014:

“Esta Norma Internacional especifica los requisitos para establecer, implementar, mantener y mejorar el sistema de gestión para la gestión de activos, llamado "sistema de gestión de activos”.

Cualquier organización puede utilizar esta Norma Internacional. La organización determina a cuáles de sus activos se aplica esta Norma Internacional. En principio, esta Norma Internacional está destinada para que la usen:

- Aquellos involucrados en establecer, implementar, mantener y mejorar el sistema de gestión de activos;
- Aquellos involucrados en desarrollar actividades de gestión de activos y prestadores de servicios;
- Las partes internas y externas que evalúan la capacidad de la organización para cumplir con requisitos legales, regulatorios y contractuales y con los requisitos propios de la organización.

El orden de los requisitos en esta Norma Internacional no refleja su importancia ni implica un orden de implementación. En la Norma ISO 55002 se proporciona orientación adicional para la implementación de los requisitos dentro de esta Norma Internacional.

En la Norma ISO 55000 se proporciona información general sobre la gestión de activos e información sobre la terminología aplicable a esta Norma Internacional. Las organizaciones pueden encontrar que la consideración de los principios las ayudará a gestionar los activos de sus organizaciones.

En esta Norma Internacional se aplica la definición de “riesgo” consignada en la Norma ISO 31000:2009 y en la Guía ISO 73:2009.

Esta Norma Internacional está diseñada para permitir a la organización alinear e integrar su sistema de gestión de activos con los requisitos de otros sistemas de gestión relacionados.”ISO (2014)

2.2.3. ISO 14224:2006:

“Proporciona una base amplia para la recogida de datos de confiabilidad y mantenimiento (RM) en un formato estándar para equipos en todas las instalaciones y las operaciones dentro de las industrias del petróleo, gas natural y petroquímicos durante el ciclo de vida útil de los equipos. En este estándar se describen los principios de recopilación de datos y los términos y definiciones asociadas que constituyen un "lenguaje de confiabilidad" que puede ser útil para comunicar la experiencia operativa.

Los modos de fallo que se definen en la norma puede ser utilizados como un "diccionario de sinónimos de confiabilidad " para diversas aplicaciones cuantitativas y cualitativas. También describe las prácticas de control y de garantía de calidad de datos para proporcionar una guía para el usuario."ISO (2006)

2.3. MARCO ORGANIZACIONAL

2.3.1. ECOPETROL S.A

Al inicio de la industria del petróleo en Colombia, el enfoque principal era la extracción y tratamiento de grandes cantidades de crudo succionado de pozos en el país, pero a su vez el crudo succionado contenía millones de pies cúbicos de gas, producto que inicialmente las compañías petroleras lo catalogaban como pérdidas y este producto era quemado en grandes proporciones en una tea. Debido a estudios de ingeniería observaron que podían aprovechar este recurso en aplicaciones industriales como la generación y al pasar los años pensaron en un recurso de combustible para automotores y uso doméstico.

A finales del siglo XIX la industria evidenció la necesidad de mejorar el sistema energético del país, con base en estudios, análisis realizados y descubrimientos de pozos gasíferos, impulsó a la industria petrolera en diseñar gasoductos y plantas de procesamiento de gas en Colombia como la refinería de Barrancabermeja.

La industria del petróleo realizó estudios en el área de Lizama Santander, pronosticando una producción cercana a 20 MPCED, ya que encontraron gran cantidad de pozos crudo gas con altas proporciones de gas, producto el cual era quemado en las teas de estaciones de recolección de crudo. A su vez nació la brillante idea de aprovechar este producto energético como es el gas y los ingenieros tomaron la decisión de construir una estación compresora de gas en noviembre de 1979, que hoy día tiene como nombre estación compresora de gas lisama, utilizada para transportar millones de pies cubico de gas a altas presiones como 700 PSIG, todo este volumen de gas es direccionado a la planta de procesos de gas ubicada en el centro de ECOPETROL.

La planta de gas de procesos del centro es la encargada de la producción de productos blancos tales como gasolina, ACPM, butano, propano y entre otros, el gas de lisama constituye el 60 % de estos productos blancos y el 40% es proveniente de la producción de opón.

Se inauguró el 20 de noviembre de 1979, al enviar 4.6 MPCED de gas comprimido a la Planta

de Gasolina El Centro. Inicialmente éste gas comprimido se enviaba por una línea de 6 pulgadas (50 Km de longitud), posteriormente en 1981 debido al incremento de la producción y a la alta condensación se instaló un gasoducto paralelo al de 6 pulgadas con el mismo propósito pero de 8 pulgadas. Actualmente se utiliza el gasoducto de 8” para enviar el gas comprimido hacia la Planta de Gasolina El Centro y el gasoducto de 6” para Recibir el gas combustible seco para alimentar los motocompresores. Man

2.3.2. ESTACIÓN LIZAMA

2.3.2.1. Ubicación geográfica

La estación compresora de gas Lisama está ubicada en el corregimiento de Lisama en la cuenca del valle del Magdalena medio aproximadamente 35 km de Barrancabermeja, Santander, área en su mayoría operada por ECOPETROL perteneciente a la superintendencia de operaciones de Mares SOM, está compuesto por varias áreas como Nutria, Peroles, Lisama y Tesoro.

“La compresora de Gas Lisama está ubicada en la franja NE del campo Lisama con coordenadas Gauss N 1.277.380 y E 1.057.818, tiene un área aproximada de 60.000m². Recoge el gas de las estaciones Central, Satélite, Sur, Suroccidental, Tesoro y Peroles a través de una red de gasoductos intercomunicados entre sí y lo comprime a 750 Psi para enviarlo a la Planta de Gasolina El Centro, segregarlo y producir productos blancos y gas seco.”Man

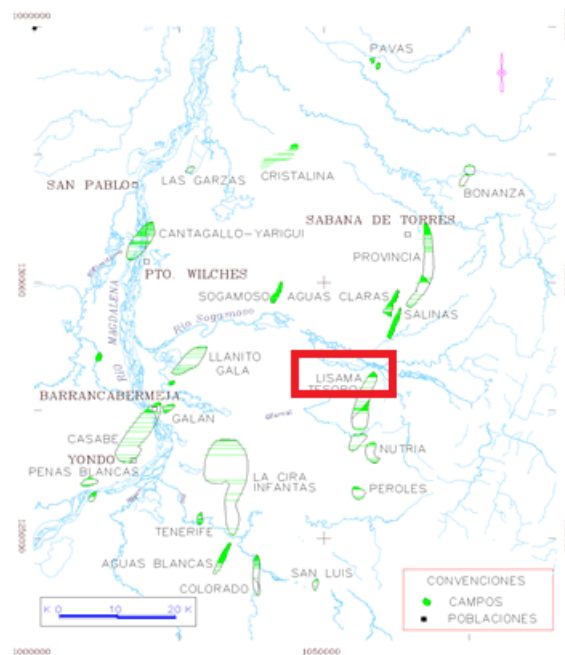


Figura 7: Ubicación Lisama. Fuente: Ecopetrol S.A

2.4. PROCESO DE COMPRESIÓN

La estación Lisama comprime el gas Natural por medio de cinco moto-compresores recíprocos marca SUPERIOR modelo MW64, cuyas características técnicas son las siguientes:

2.4.1. Ficha técnica del equipo a analizar:

- DATOS DE FABRICACIÓN MOTOR:

MODELO: 12G 825

MARCA: SUPERIOR

VELOCIDAD: 900 RPM POTENCIA: 1225 HP

- CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS:

TIPO: MOTOR SUPERIOR 12G825

Nº DE CILINDROS: 12 EN V

Nº DE VÁLVULAS POR CILINDRO: 2 (1 admisión – 1 Escape)

ORDEN DE ENCENDIDO: 1-4-2-6-3-5

■ **INFORMACIÓN TÉCNICA OPERACIONAL DEL COMPRESOR:**

MOTOCOMPRESOR RECIPROCANTE

MARCA SUPERIOR

MODELO MW64

CAPACIDAD: 3.5 KPCD

FLUIDO GAS

Nº DE ETAPAS: 3

PRESIÓN MAX. FLUIDO: 900 PSI

VELOCIDAD: 900 RPM

STROKE: 6 PULGADAS.Man

2.4.2. Especificaciones técnicas de las etapas compresoras:

2.4.2.1. ETAPA # 1:

DESCARGA: 50.4 PSIA

PRES. SUCCI: 10.8 PSIA

VALV. SUCC TIPO: 901-264 DE D: 9 1/8"

VALV. DESC TIPO: 901-263 DE D: 9 1/8"

MODELO CILINDRO: 130 CD

2.4.2.2. ETAPA # 2

DESCARGA: 182.2 PSIA

PRES. SUCCI.: 49 PSIA

VALV. SUCC TIPO: 901-226 DE D: 7"

VALV. DESC TIPO: 901-225 DE D: 7"

MODELO CILINDRO: 67 AD

2.4.2.3. ETAPA # 3

DESCARGA: 705 PSIA

PRES. SUCCI.: 178 PSIA

VALV. SUCC TIPO: 901-289 DE D:4"

VALV. DESC TIPO: 901-292 DE D:4"

MODELO CILINDRO: 119 CD Man

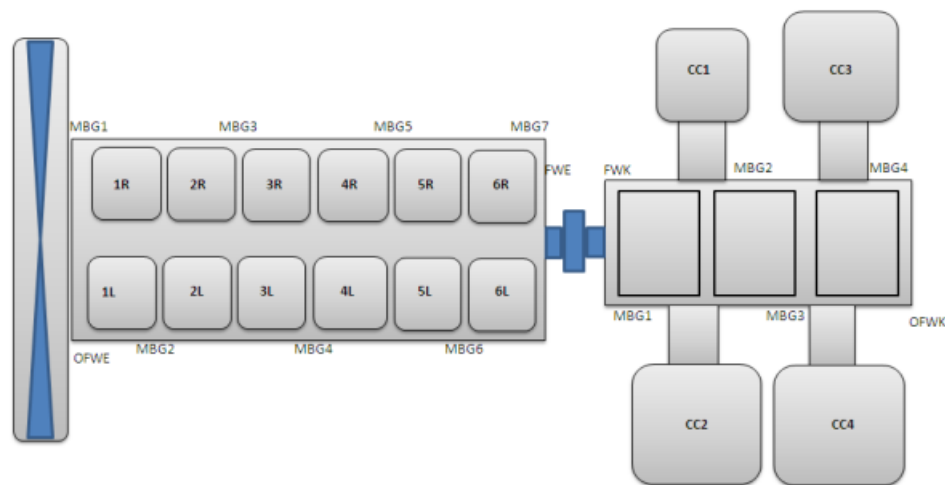


Figura 8: Esquema general máquina K6 Lisama. Fuente: Confipetrol

SEÑAL	Alarma	Parada
Switch por alta presión succión	24 InHg	38 InHg
Switch por baja presión succión	21.3 InHg	21 InHg
Switch por alta presión descarga 1 Etapa	37 psi	45 psi
Switch por baja presión descarga 1 Etapa	7 psi	5 psi
Switch por alta presión descarga 2 Etapa	175 psi	187 psi
Switch por baja presión descarga 2 Etapa	100 psi	80 psi
Switch por alta presión descarga 3 Etapa	724 psi	790 psi
Switch por baja presión descarga 3 Etapa	470 psi	450 psi
Transmisor temperatura cojinete motor	228 °F	232 °F
Transmisor temperatura agua motor	210°F	215°F
Transmisor temperatura agua compresor	210°F	215°F
Transmisor temp aceite motor	220 °F	225°F
Transmisor temp aceite compresor	220°F	225°F
Transmisor temp gases escape cil 1	1350°F	
Transmisor presión bomba agua motor alta	50 psi	
Transmisor presión bomba agua motor baja	12 psi	10 psi
Transmisor presión aceite motor	25 psi	20 psi
Transmisor presión aceite compresor	25 psi	20 psi
Transmisor temp cilindro compr 1, 2,3,4	320 psi	330 psi
Transmisor presión aire alta	200 psi	
Transmisor presión aire baja	100 psi	
Transmisor presión gas combustible alta	60 psi	
Transmisor presión gas combustible baja	10 psi	
Over speed		990 rpm
Válvula seguridad 1 Etapa		75 psi
Válvula seguridad 2 Etapa		200 psi
Válvula seguridad 3 Etapa		900 psi

Figura 9: Ventana operativa de cada unidad compresora. Fuente: Autor.

Capítulo 3

Modelado del sistema de compresión de gas estación Lizama de Ecopetrol S.A

3.1. Descripción Modelado Sistema Compresión Gas Lizama

La estación compresora de gas Lizama de ECOPETROL S.A cuenta con un sistema de compresión de gas que se compone de cinco unidades compresoras interconectadas entre sí en una configuración paralelo, el modelo es un sistema homogéneo cuyas entradas y salidas son gas a baja presión y gas comprimido a alta presión respectivamente.

El modelo está enfocado en maximizar la confiabilidad al sistema y diseñado con el propósito de garantizar el paso de gas desde la entrada hasta la salida, pasando por una fase de compresión de gas. El modelo aplicado cuenta con 5 unidades o componentes K3 Lizama, K4 Lizama, K5 Lizama, K6 Lizama, y K7 Lizama, utilizadas en modo de operación 3x2, es decir, que normalmente operan 3 unidades y quedan dos disponibles para cuando el sistema lo requiera, las unidades o componentes deben poseer características idénticas para que el sistema opere con normalidad, como por ejemplo:

1. Igual estructura y dimensión.
2. Igual capacidad y tamaño.
3. Igual ficha técnica del fabricante.
4. Toma de gas de entrada del mismo cabezal de succión.
5. Envían el gas de salida al mismo cabezal de descarga.

6. Toma de gas combustible para su alimentación del mismo cabezal o tubería.
7. Toma de aire del mismo cabezal o tubería.

Es muy importante para el éxito del sistema que las cinco unidades sean iguales y cuenten con el mismo diseño de instalación, fabricación y ficha técnica, así al momento de sustituir una unidad por otra no exista impacto en la entrega del producto. De esta forma se asegura la máxima disponibilidad del sistema, ya que cada vez que falle una unidad el sistema este respaldado con otros equipos, es decir una unidad puede fácilmente reemplazar a la otra sin generar afectación en el desempeño del sistema.

3.2. Descripción de operación del modelo:

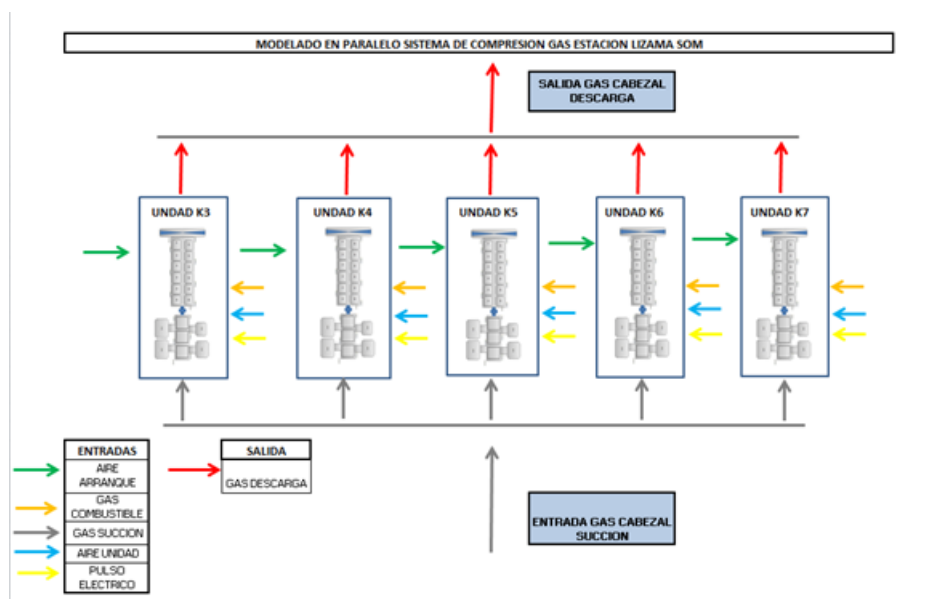


Figura 10: Modelado Sistema de compresión de Gas Estación Lisama. Fuente Autor

El sistema está configurado para que opere de la siguiente forma: Tres unidades operando, una cuarta unidad stand-by (disponible para el arranque apenas falle alguna) y una quinta unidad como respaldo para cumplir con los planes de mantenimiento programados y establecidos por la gerencia. Es decir el sistema opera con tres unidades activas y dos en vacío, si este esquema no se cumple, se incurre en una falla funcional del sistema disminuyendo la confiabilidad e incumpliendo con el caudal de gas requerido en el campo.

Cada unidad cuenta con cinco entradas y una salida para su operación:

El gas es tomado del cabezal principal de succión (entrada baja presión 1 - 4 PSIG) luego cada unidad lo comprime aumentando su presión de gas en cada una de sus tres etapas y luego el gas es enviado al cabezal principal de descarga (salida) alta presión (600 - 700 PSIG), de manera que cada unidad cumpla con su función sin afectar a la otra.

El sistema debe entregar un promedio entre 8 y 9 mil millones de ft^3 de gas diario, es decir cada unidad aporta de 2,8 a 3 mil millones de ft^3 de gas diario para cumplir con la producción.

3.3. Descripción de Fronteras y Fase de Compresión:

El sistema cuenta con las siguientes fronteras, las cuales son sometidas a la fase de compresión:

3.3.1. Entradas del Sistema:

1. **Entrada gas succión:** Gas proveniente de pozos productores de los campos, tratado en las diferentes estaciones de recolección de crudo como central, satélite, sol, tesoro y peroles, luego es enviado por tubería de 6" a la estación compresora de gas lisama, donde el flujo de gas pasa por un separador ubicado en la succión de la estación, este a su vez separa gas-condensado, el gas seco continua hacia el cabezal o tubería principal de succión de 14" y el condensado del mismo queda en el fondo del recipiente, el separador cuenta con sistemas de control de nivel que funciona de acuerdo al nivel de condensados que tenga el separador, este evacua el condensado del separador por medio de una tubería de drenaje que está conectada directamente a la trampa de retención API. Desde esta tubería es succionado el gas por las diferentes unidades compresoras, la presión de succión es alrededor de 1 a 4 PSI
2. **Entrada gas combustible:** Gas proveniente del cabezal o tubería principal de descarga de 8" de la estación, este cabezal cuenta con una derivación o tubería que está conectada a un separador de gas de primer corte, aguas arriba del separador está instalado una válvula de control de presión de gas PCV, cuya función es reducir la presión de 700 PSI a 150 PSI, el gas seco continua hacia un separador de segundo corte y el condensado del mismo queda en el fondo del recipiente, el separador cuenta con sistemas de control de nivel que funciona de acuerdo al nivel de condensados que tenga el separador, este evacua el condensado

del separador por medio de una tubería de drenaje que está conectada directamente al tanque bala de condensado TK-01. Luego el flujo de gas es direccionado al separador de segundo corte, aguas arriba del separador está instalado una segunda válvula de control de presión de gas PCV, cuya función es reducir la presión de gas de 150 PSI a 60 PSI, el gas seco continua hacia un separador de segundo corte y el condensado del mismo queda en el fondo del recipiente, el separador cuenta con sistemas de control de nivel que funciona de acuerdo al nivel de condensados que tenga el separador, este evacua el condensado del separador por medio de una tubería de drenaje que está conectada directamente al tanque bala de condensado TK-01.

3. **Entrada de aire unidad:** Aire tomado de la atmósfera mediante el principio de admisión de aire del motor, que succiona aire y lo envía por medio de unos filtros a los carburadores de cada motor de la unidad para su funcionamiento. Nota: La entrada 2 y 3 se unen en proporción para su posterior mezcla en una cámara, obteniendo una mezcla aire-gas esquiometrica en cada unidad.
4. **Entrada eléctrica por unidad:** Energía generada por un sistema de ignición ubicado en el motor, este funciona emitiendo pulsos de voltajes DC en cada uno de los cilindros del motrices, mediante una secuencia o lógica de encendido en que está diseñado el motor de acuerdo al fabricante, el sistema de ignición envía un promedio de 8000 y 10000 VDC a cada cilindro, cada unidad cuenta con su propio sistema de ignición individual.
5. **Entrada de aire arranque:** Aire proveniente de un compresor de aire ubicado en la estación, que suministra aire a presión aproximadamente entre 120 y 150 PSIG, este fluido es utilizado para impulsar la apertura de dos válvula neumática ON-OFF de 1 ½" ubicadas en el motor, estas a su vez dan paso de aire para activar los motores de arranque que ejercen la fuerza de giro sobre la volanta del motor. Cuando la volanta alcance una velocidad superior a 300 RPM, el sistema de control envía una señal para activar el sistema de ignición y el de gas combustible, permitiendo la combustión en el equipo y la puesta en servicio de la unidad a una velocidad de 650 RPM.

3.3.2. Fase de Compresión de Gas:

Sistema que está comprendido por tres etapas que interactúan entre si de manera consecutiva, recibiendo gas a baja presión, comprimiendo y enviando gas a altas presiones a la siguiente

etapa, de forma que aumenta la presión por etapa, cada etapa consta de cilindros y separadores retenedores de líquidos condensados que son drenados por controles de nivel instalados en los separadores, luego estos condensados son dirigidos al tanque bala TK-01 ubicado en la estación. Cada unidad funciona de la siguiente manera: recibe, comprime y descarga gas al cabezal principal.

Cada unidad compresora está compuesta por tres partes con funciones diferentes que son:

- **Cooler:** Posee un ventilador de grandes dimensiones y un sistema de tuberías internas, transporta fluido refrigerante, esto para proveer a las partes internas del motor una adecuada temperatura durante su funcionamiento y combustión.
- **Motor:** Equipo mecánico, alimentado con gas combustible con una mezcla esquiométrica pobre es decir mayor porcentaje de aire y menor en el gas, cuenta con 12 cilindros motrices para realizar la combustión, velocidad nominal sin carga 650 RPM, velocidad nominal de trabajo con carga 900 RPM, cuenta con un sistema de aire para el arranque. Este equipo es el encargado de hacer girar al compresor de gas a una velocidad de 900 RPM con carga.
- **Compresor de gas:** Equipo mecánico que funciona de acuerdo a la fuerza de giro que le ejerce el motor y su velocidad es igual al mismo, ya que están unidos por medio de un acople. El compresor cuenta con tres etapas de compresión de gas y posee 4 cilindros compresores, el cual cada uno de ellos pertenece a una etapa de compresión de gas, el cilindro # 2 y 4 pertenecen a la primera etapa, el #3 segunda etapa y el cilindro #1 a la tercera etapa.

El proceso de compresión inicia desde el cabezal o tubería principal de succión de gas, ya que las tres unidades compresoras en operación succionan gas a una presión variante entre 1 a 4 PSI de acuerdo al proceso. Existe por unidad compresora una válvula de control de presión PCV ubicada aguas arriba de la misma, que es la encargada de controlar el flujo y la presión de gas de acuerdo a la carga de trabajo de cada unidad. El fluido de gas es direccionado al separador de succión de la unidad donde se almacena el gas, después es enviado a los cilindros compresores # 2 y 4 para iniciar el proceso de compresión de gas enviándolo al separador de primera etapa con una presión promedio entre 16 a 75 PSIG, así mismo el fluido de gas es direccionado al cilindro compresor # 3 para continuar el proceso de compresión de gas enviándolo al separador de segunda etapa con una presión promedio entre 100 a 200 PSIG, de la misma forma el fluido

de gas es direccionado al cilindro compresor # 1 para continuar el proceso de compresión de gas, enviándolo al separador de tercera etapa con una presión promedio entre 600 a 700 PSIG aproximadamente, para luego ser enviado al cabezal o tubería principal de descarga de la estación compresora lisama.

Cada paso de fluido de gas por cada uno de los separadores en las diferentes etapas primera, segunda y tercera de la unidad, implica una retención considerable de líquidos condensados por separador de cada etapa. Este condensado queda en el fondo del separador y por medio de sistemas de control de nivel neumáticos, que funcionan de acuerdo al nivel de condensados que contenga el separador, este a su vez evacua el líquido condensado del separador por medio de una tubería de drenaje que está conectada directamente al tanque de condensado TK-01.

3.3.3. Salida gas:

Cuenta con un cabezal o tubería con diámetro de 8", utilizado para la descarga de gas de todas las unidades compresoras, sosteniendo una presión promedio entre 650 - 700 PSI y un flujo de gas entre 8 y 10 millones de pies cúbicos día. La salida del cabezal cuenta con un sistema de medición de gas de vital importancia, para evidenciar la cantidad de flujo de salida de gas de la estación, el cálculo de medida tiene en cuenta tres variables de medida en el cabezal, tales como la presión diferencial "elemento platina de orificio", medida de temperatura y la medida de la presión estática, estas magnitudes son sensadas por un instrumento medidor multivariable y enviadas por medio de una señal electrónica a un sistema de visualización y supervisión Scada en el cuarto de control.

El flujo de gas de la estación compresora Lisama es enviado directamente a la planta de procesos el centro, para el tratamiento del mismo y la generación de productos blancos. Existen dos derivaciones y dos puntos de separación de gas-condensado en el trayecto de envío de gas hasta la planta de procesos y están ubicados de acuerdo al orden del trayecto compresora Lisama hasta la planta de procesos y es el siguiente:

1. Primera derivación: Flujo de gas suministrado a la planta de generación Coopower.
2. Punto 1: separación Lisama 10.
3. Punto 2: separación Lisama 10.
4. Segunda derivación: Flujo de gas suministrado a San Vicente.



Figura 11: Ruta de gas compresora Lisama. Fuente Autor.

La primera derivación es utilizada para enviar una proporción de gas a la planta de generación Coopower, con un promedio entre 1500 a 1600 KFTD Kilo pies cúbicos día, temperatura 100 – 110 grados F y presión en promedio de 650 – 700 PSI, está derivación se encuentra ubicada en la salida de la estación compresora lisama.

El transporte del gas continua su ruta hacia la planta de procesos por la tubería de 8” y llega al primer punto de separación de gas – condensado llamado separador lisama 10, en este punto el gas es separado del condensado, el gas seco continua su ruta y el condensado del mismo queda en el fondo del recipiente, el separador cuenta con sistemas de control de nivel que funciona de acuerdo al nivel de condensados que tenga el separador, este a su vez evacua el condensado del separador por medio de una tubería de drenaje que está conectada directamente al tanque de condensado TK-01, ubicado en la estación compresora Lisama.

El transporte del gas continua su ruta hacia la planta de procesos y llega al segundo punto de separación de gas – condensado llamado separador Lisama 30, en este punto el gas es separado del condensado, el gas seco continua su ruta y el condensado del mismo queda en el fondo del recipiente, el separador cuenta con sistemas de control de nivel que funciona de acuerdo al nivel de condensados que tenga el separador, este a su vez evacua el condensado del separador por medio de una tubería de drenaje que está conectada directamente al tanque bala de condensado TK-01, ubicado en la estación compresora Lisama.

El transporte del gas continua su ruta hacia la planta de procesos y llega a la segunda derivación que es utilizada para enviar una proporción de gas al corregimiento de San Vicente, con un promedio entre 500 a 600 KFTD Kilo pies cúbicos día, temperatura 100 – 110 grados F y presión en promedio de 650 – 700 PSI, está derivación se encuentra ubicada en un corregimiento llamado Playa Roja.

El transporte del gas continúa su ruta hacia la planta de procesos llegando a su punto final cabezal de succión de la planta, el gas suministrado por la estación compresora Lisama equivale a un 60 % de gas del 100 % que recibe la planta de procesos, en otro 40 % es suministrado por el gasoducto Opón.

Para que el sistema funcione correctamente, otorgue una confiabilidad óptima y pueda cumplir con la producción, debe entregar entre 8 y 10 millones de pies cúbicos día, para esto deben estar funcionando y enviando flujo de gas constante durante las 24 horas como mínimo 3 unidades y dos disponibles, ya que cada unidad entrega un promedio de flujo de gas entre 2,8 a 3 millones de KFT cúbicos de gas diario. Si este esquema no se cumple incurre en una falla funcional del modelo disminuyendo la confiabilidad del sistema e incumpliendo con la entrega de gas requerida en el campo e impactando otros procesos y plantas que dependen de la estación.

COMPONENTES	GAS SECO	GAS RICO
	EL CENTRO	LISAMA
	% Molar	% Molar
OXIGENO	0.036	0.000
NITROGENO	0.560	0.110
DIOXIDO DE CARBONO	0.810	0.190
METANO	93.041	78.360
ETANO	4.544	9.410
PROPANO	0.980	5.780
I-BUTANO	0.008	1.140
N-BUTANO	0.008	2.070
I-PENTANO	0.008	0.700
N-PENTANO	0.005	0.620
HEXANOS	0.000	1.620
TOTAL	100.000	100.000
PESO MOLECULAR	17.268	22.278
G.P.M	0.364	3.866
BTU NETO/PC	942.650	1217.370
BTU BRUTO/PC	1044.760	1339.260
FACTOR Z	0.998	0.996
GRAVEDAD ESPECIFICA	0.596	0.773

Figura 12: Propiedades del gas rico de Lisama y el gas seco del centro. Fuente: Manual de Operación Man

Capítulo 4

Confiabilidad operativa de los componentes del sistema de compresión de gas utilizando la distribución Weibull triparámetro.

4.1. Ordenar Información:

Para poder calcular la confiabilidad de cada componente del sistema se requiere organizar la información de tiempos operacionales de cada unidad compresora de la estación Lizama, el sistema de información documenta la cantidad de horas operativas, en “stand by”, horas en paradas programadas, paradas externas y horas de paradas no programadas, estas últimas representan el tiempo de reparación. Dichos tiempos se documentan día a día entre el primero de enero de 2015 hasta el 31 de diciembre de 2015, para las unidades K3 Lizama, K4 Lizama, K5 Lizama, K6 Lizama, y K7 Lizama, se denominan bajo las etiquetas respectivas 3 LIS, 4 LIS, 5 LIS, 6 LIS y 7 LIS. La información se encuentra consignada en un archivo de Microsoft Excel, por lo cual se crea una hoja de cálculo independiente para el respectivo análisis de cada unidad compresora.

FECHA CALENDARIO	MES	EQUIPO	CAMPO	H TOT	H OPER	STB	Hrs. PROG.	Hrs. NO PROG.	HORAS PARADAS EXTERNAS	PARADAS EXTERNAS
1/1/2015	ENERO	7 LIS	LISAMA	24.0	24.0					
1/2/2015	ENERO	7 LIS	LISAMA	24.0	24.0					
1/3/2015	ENERO	7 LIS	LISAMA	24.0	24.0					

Tabla 5: Formato de Registro de Tiempos. Fuente: Confipetrol

4.2. Determinar TTF, TTR y TBF

La correcta cuantificación de los tiempos a fallar, tiempos de reparación y tiempos entre falla requiere de la adición de columnas adicionales al formato de la Tabla 5, las cuales engloben los tiempos a fallar y tiempos de reparación que finalmente lleven a determinar los tiempos entre fallas. En el presente estudio solo se entiende por tiempo de reparación como el número de horas no programadas en las cuales se requirió una intervención para la reactivación de la operatividad de una unidad compresora. Conforme a esto se agrupan los tiempos operativos, los tiempos en “stand by”, horas en paradas programadas, paradas externas y se les denomina “Ton”, el cual denota el tiempo que la unidad estuvo disponible para un día calendario determinado.

FECHA CALENDARIO	MES	EQUIPO	CAMPO	H TOT	H OPER	STB	Ton	TTF	0	TTR	Hrs. PROG	Hrs. NO PROG	HORAS PARADAS EXTERNAS	PARADAS EXTERNAS	Paradas correctivas
1/1/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	0.0	24.0	24.0	24.0	0.0	0.0					
1/2/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	0.0	24.0	24.0	48.0	0.0	0.0					
1/3/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	0.0	24.0	24.0	72.0	0.0	0.0					
1/4/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	0.0	24.0	24.0	96.0	0.0	0.0					
1/5/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	0.0	24.0	24.0	120.0	0.0	0.0					
1/6/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	9.0	6.0	15.0	135.0	9.0	9.0		9.0			1.00
1/7/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	8.0		8.0	8.0	16.0	40.0		16.0			1.00
1/8/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	0.0		0.0	0.0	24.0	0.0		24.0			

Tabla 6: Formato de Registro Modificado. Fuente: Autor

En las columna TTF se acumulan los tiempos en los cuales la unidad opero sin fallas, reiniciándose cada vez que ocurre una falla de tal manera que para la fecha cuando se registró la falla el valor de la celda representa el tiempo a fallar, en la columna TTR para ese misma fecha se registra el tiempo total que se requirió para despejar la falla, dejando sus demás valores en cero.

4.3. Preparando los datos para aplicar Weibull

Filtrando la columna TTR para ocultar los valores registrados como “0”, se obtendrá únicamente los días en que se presentaron fallas, el tiempo de reparación de dichas fallas y el tiempo a fallar posterior a la reparación.

FECHA CALENDARI	MES	EQUIPO	CAMPO	H TOT	N OPER	STB	Ton	TTF	0	TTR	Hrs. PROG	Hrs. NO PROG	HORAS PARADAS EXTERNAS	PARADAS EXTERNAS
1/6/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	9.0	6.0	15.0	135.0	9.0	9.0		9.0		
1/7/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	8.0		8.0	8.0	16.0	40.0		16.0		
1/9/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	2.0		2.0	2.0	22.0	118.0		22.0		
1/14/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	6.0		6.0	6.0	18.0	18.0		18.0		
1/15/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	8.0		8.0	8.0	16.0	40.0		16.0		
1/17/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	9.0		9.0	9.0	15.0	15.0		15.0		
1/20/2015	ENERO	3 LIS	LISAMA	24.0	10.0		10.0	58.0	14.0	494.0		14.0		
2/10/2015	FEBRERO	3 LIS	LISAMA	24.0	7.0		7.0	7.0	17.0	17.0		17.0		
2/11/2015	FEBRERO	3 LIS	LISAMA	24.0	23.0		23.0	23.0	1.0	217.0		1.0		
2/21/2015	FEBRERO	3 LIS	LISAMA	24.0	8.0		8.0	8.0	16.0	16.0		16.0		
2/22/2015	FEBRERO	3 LIS	LISAMA	24.0	19.0		19.0	19.0	5.0	5.0		5.0		
2/23/2015	FEBRERO	3 LIS	LISAMA	24.0	12.0		12.0	12.0	12.0	12.0		12.0		

Tabla 7: Filtro de Fallas Unidad 3 Lis. Fuente: Autor.

De esta manera se puede determinar los tiempos entre fallas sumando el tiempo de reparación de una falla con el tiempo a fallar inmediatamente posterior como se muestra en la Tabla 9 (no se muestran todas las fallas).

Posteriormente se reorganizan ascendentemente los datos de los tiempos a fallar, tiempos de reparación y tiempos entre falla para el análisis de Weibull respectivo. Se calculan los tiempos medios de operación utilizando las fórmulas de la Subsección 2.1.1 como referencia para el análisis de Weibull posterior, se presentan en la Tabla 8.

UNIDAD	MTBF	MTTR	MTTF	# FALLAS
3 LIS	134.77	31.37	103.40	65.00
4 LIS	1254.86	177.00	1077.86	7.00
5 LIS	265.45	36.52	228.94	33.00
6 LIS	461.05	310.53	150.53	19.00
7 LIS	438.00	8.35	429.65	20.00

Tabla 8: Tiempos Medios de Operación. Fuente Autor

Fecha	TTF	TTR	TBF
1/6/2015	135.0	9.0	17.00
1/7/2015	8.0	40.0	42.00
1/9/2015	2.0	118.0	124.00
1/14/2015	6.0	18.0	26.00
1/15/2015	8.0	40.0	49.00
1/17/2015	9.0	15.0	73.00
1/20/2015	58.0	494.0	501.00
2/10/2015	7.0	17.0	40.00
2/11/2015	23.0	217.0	225.00
2/21/2015	8.0	16.0	35.00
2/22/2015	19.0	5.0	17.00
2/23/2015	12.0	12.0	23.00
2/24/2015	11.0	13.0	16.00
2/25/2015	3.0	189.0	196.00
3/5/2015	7.0	17.0	317.00
3/18/2015	300.0	12.0	464.00
4/6/2015	452.0	4.0	57.00
4/9/2015	53.0	67.0	82.00
4/12/2015	15.0	9.0	17.00
4/13/2015	8.0	16.0	30.00
4/14/2015	14.0	10.0	124.00
4/19/2015	114.0	6.0	457.00
5/8/2015	451.0	5.0	891.00
6/14/2015	886.0	2.0	433.00
7/2/2015	431.0	25.0	29.00
7/4/2015	4.0	284.0	290.00
7/16/2015	6.0	18.0	242.00
7/26/2015	224.0	16.0	27.00
7/27/2015	11.0	13.0	104.00
7/31/2015	91.0	5.0	9.00
8/1/2015	4.0	20.0	91.50
8/4/2015	71.5	0.5	19.50
8/5/2015	19.0	5.0	20.50

Tabla 9: Fallas Registradas en la Unidad 3 Lis. Fuente: Autor.

4.4. Análisis de Weibull Triparámetro

4.4.1. Calcular Parámetro Forma y Escala

Teniendo los datos debidamente organizados se trasladan la hoja de calculo de Weibull, para cada falla se calcula el rango mediana aplicando la Ecuación 2.6, se evalúan los componentes de regresión lineal suponiendo inicialmente el parámetro localización $\delta = 0$. Los resultados de dichas operaciones se muestran en la Tabla 10 y se grafican en la Figura 13.

Se encuentra que el parámetro de forma $\beta = 0,8808$, un parámetro de escala $\eta = 114,638$ horas, para una coeficiente de correlación de datos $R^2 = 0,8491$. Para estos parámetros el Tiempo medio entre fallas MTBF tiene un valor de 122.09 horas, distanciándose del valor de referencia calculado de la manera convencional para la Unidad 3 Lis en un 9.41 %

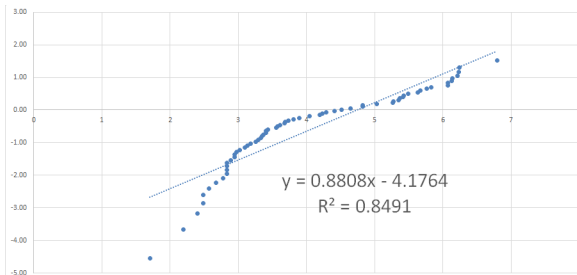


Figura 13: Regresión Lineal con Localización en cero. Fuente Autor

i	TBF	t-6	Rango Mediana	X=Ln(t-δ)	Y=Ln(-Ln(1-F(t-δ)))
1	5.5	5.5	1.061%	1.70474809	-4.54
2	9.0	9	2.569%	2.19722458	-3.65
3	11.0	11	4.093%	2.39789527	-3.18
4	12.0	12	5.620%	2.48490665	-2.85
5	12.0	12	7.149%	2.48490665	-2.60
6	13.0	13	8.679%	2.56494936	-2.40
7	14.5	14.5	10.208%	2.67414865	-2.23
8	16.0	16	11.738%	2.77258872	-2.08
9	17.0	17	13.268%	2.83321334	-1.95
10	17.0	17	14.799%	2.83321334	-1.83
11	17.0	17	16.329%	2.83321334	-1.72
12	17.0	17	17.859%	2.83321334	-1.63
13	18.0	18	19.390%	2.89037176	-1.53
14	19.0	19	20.920%	2.94443898	-1.45
15	19.0	19	22.451%	2.94443898	-1.37
16	19.5	19.5	23.981%	2.97041447	-1.29
17	20.5	20.5	25.512%	3.02042489	-1.22
18	22.0	22	27.042%	3.09104245	-1.15
19	23.0	23	28.573%	3.13549422	-1.09
20	24.0	24	30.103%	3.17805383	-1.03
21	26.0	26	31.634%	3.25809654	-0.97
22	27.0	27	33.164%	3.29583687	-0.91
23	28.0	28	34.695%	3.33220451	-0.85
24	28.5	28.5	36.225%	3.34990409	-0.80
25	29.0	29	37.756%	3.36729583	-0.75
26	30.0	30	39.286%	3.40119738	-0.70
27	30.0	30	40.817%	3.40119738	-0.65
28	31.0	31	42.347%	3.4339872	-0.60
29	35.0	35	43.878%	3.55534806	-0.55
30	35.5	35.5	45.408%	3.5695327	-0.50
31	37.0	37	46.939%	3.61091791	-0.46
32	39.5	39.5	48.469%	3.67630067	-0.41
33	40.0	40	50.000%	3.68887945	-0.37
34	42.0	42	51.531%	3.73769662	-0.32
35	45.0	45	53.061%	3.80666249	-0.28
36	49.0	49	54.592%	3.8918203	-0.24
37	57.0	57	56.122%	4.04305127	-0.19
38	66.0	66	57.653%	4.18965474	-0.15
39	69.0	69	59.183%	4.2341065	-0.11
40	73.0	73	60.714%	4.29045944	-0.07
41	82.0	82	62.244%	4.40671925	-0.03
42	91.5	91.5	63.775%	4.51633897	0.02
43	104.0	104	65.305%	4.6443909	0.06
44	124.0	124	66.836%	4.82028157	0.10
45	124.0	124	68.366%	4.82028157	0.14
46	153.0	153	69.897%	5.03043792	0.18
47	193.0	193	71.427%	5.26269019	0.23
48	196.0	196	72.958%	5.27811466	0.27
49	211.0	211	74.488%	5.35185813	0.31
50	215.0	215	76.019%	5.37063803	0.36
51	225.0	225	77.549%	5.4161004	0.40
52	227.0	227	79.080%	5.42495002	0.45
53	242.0	242	80.610%	5.48893773	0.49
54	280.0	280	82.141%	5.6347896	0.54
55	290.0	290	83.671%	5.66988092	0.59
56	317.0	317	85.201%	5.75890177	0.65
57	341.0	341	86.732%	5.83188248	0.70
58	433.0	433	88.262%	6.07073773	0.76
59	434.0	434	89.792%	6.07304453	0.83
60	457.0	457	91.321%	6.12468339	0.89
61	464.0	464	92.851%	6.13988455	0.97
62	501.0	501	94.380%	6.2166061	1.06
63	508.0	508	95.907%	6.23048145	1.16
64	513.0	513	97.431%	6.24027585	1.30
65	891.0	891	98.939%	6.79234443	1.51

Tabla 10: Regresión Lineal Localización en cero. Fuente Autor

4.4.2. Calcular Parámetro Localización

Para maximizar la precisión de la herramienta Weibull se debe maximizar el coeficiente de correlación de datos de la regresión R^2 . Esto se realiza usando la aplicación de Excel “Solve”, la cual da valores al parámetro localización de forma evolucionaría o progresiva hasta encontrar el valor que maximiza la correlación de datos, usualmente se inicia con valores inferiores al primer dato, el parámetro localización en la mayoría de los casos es positivo e inferior al primer datos. Se calcula el parámetro localización maximizando la correlación de los datos y se grafican en la Figura 16.

Después de las diferentes iteraciones se encuentra que el valor del parámetro de localización que maximiza la correlación de datos es $\delta = 5,2918$, los primeros dos parámetros de Weibull forma y escala cambian a $\beta = 0,7532$ y $\eta = 101,46$ horas, para una coeficiente de correlación de datos $R^2 = 0,9219$.

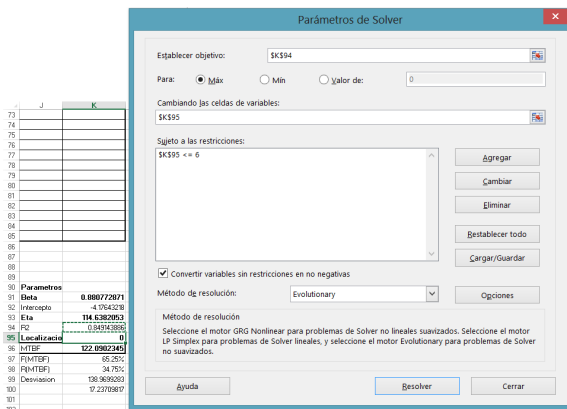


Figura 14: Interfase Solver Aplicativo Excel. Fuente Excel

i	TBF	t-δ	Rango Mediana	X=Ln(t-δ)	Y=Ln(-Ln(1-F(t-δ)))
1	5.5	0.20815274	1.061%	-1.56948312	-4.54
2	9.0	3.70815274	2.569%	1.31053384	-3.65
3	11.0	5.70815274	4.093%	1.74189546	-3.18
4	12.0	6.70815274	5.620%	1.90332361	-2.85
5	12.0	6.70815274	7.149%	1.90332361	-2.60
6	13.0	7.70815274	8.679%	2.04227857	-2.40
7	14.5	9.20815274	10.208%	2.22008926	-2.23
8	16.0	10.7081527	11.738%	2.37100539	-2.08
9	17.0	11.7081527	13.268%	2.46028541	-1.95
10	17.0	11.7081527	14.799%	2.46028541	-1.83
11	17.0	11.7081527	16.329%	2.46028541	-1.72
12	17.0	11.7081527	17.859%	2.46028541	-1.63
13	18.0	12.7081527	19.390%	2.54224374	-1.53
14	19.0	13.7081527	20.920%	2.61799075	-1.45
15	19.0	13.7081527	22.451%	2.61799075	-1.37
16	19.5	14.2081527	23.981%	2.65381594	-1.29
17	20.5	15.2081527	25.512%	2.72183165	-1.22
18	22.0	16.7081527	27.042%	2.81589679	-1.15
19	23.0	17.7081527	28.573%	2.87402514	-1.09
20	24.0	18.7081527	30.103%	2.9289594	-1.03
21	26.0	20.7081527	31.634%	3.03052748	-0.97
22	27.0	21.7081527	33.164%	3.07768789	-0.91
23	28.0	22.7081527	34.695%	3.12272401	-0.85
24	28.5	23.2081527	36.225%	3.14450363	-0.80
25	29.0	23.7081527	37.756%	3.16581899	-0.75
26	30.0	24.7081527	39.286%	3.20713326	-0.70
27	30.0	24.7081527	40.817%	3.20713326	-0.65
28	31.0	25.7081527	42.347%	3.24680817	-0.60
29	35.0	29.7081527	43.878%	3.39142151	-0.55
30	35.5	30.2081527	45.408%	3.40811185	-0.50
31	37.0	31.7081527	46.939%	3.45657383	-0.46
32	39.5	34.2081527	48.469%	3.532464	-0.41
33	40.0	34.7081527	50.000%	3.54697461	-0.37
34	42.0	36.7081527	51.531%	3.60299888	-0.32
35	45.0	39.7081527	53.061%	3.68155653	-0.28
36	49.0	43.7081527	54.592%	3.77753465	-0.24
37	57.0	51.7081527	56.122%	3.94561546	-0.19
38	66.0	60.7081527	57.653%	4.106078	-0.15
39	69.0	63.7081527	59.183%	4.15431254	-0.11
40	73.0	67.7081527	60.714%	4.2152066	-0.07
41	82.0	76.7081527	62.244%	4.340008	-0.03
42	91.5	86.2081527	63.775%	4.45676475	0.02
43	104.0	98.7081527	65.305%	4.59216754	0.06
44	124.0	118.708153	66.836%	4.77666798	0.10
45	124.0	118.708153	68.366%	4.77666798	0.14
46	153.0	147.708153	69.897%	4.99523839	0.18
47	193.0	187.708153	71.427%	5.23488838	0.23
48	196.0	190.708153	72.958%	5.25074426	0.27
49	211.0	205.708153	74.488%	5.32645843	0.31
50	215.0	209.708153	76.019%	5.34571682	0.36
51	225.0	219.708153	77.549%	5.39230009	0.40
52	227.0	221.708153	79.080%	5.40136189	0.45
53	242.0	236.708153	80.610%	5.46682796	0.49
54	280.0	274.708153	82.141%	5.61570927	0.54
55	290.0	284.708153	83.671%	5.65146463	0.59
56	317.0	311.708153	85.201%	5.74206734	0.65
57	341.0	335.708153	86.732%	5.81624219	0.70
58	433.0	427.708153	88.262%	6.05844108	0.76
59	434.0	428.708153	89.792%	6.06077639	0.83
60	457.0	451.708153	91.321%	6.11303629	0.89
61	464.0	458.708153	92.851%	6.12841418	0.97
62	501.0	495.708153	94.380%	6.20598735	1.06
63	508.0	502.708153	95.907%	6.22000979	1.16
64	513.0	507.708153	97.431%	6.22990678	1.30
65	891.0	885.708153	98.939%	6.7863875	1.51

Figura 15: Datos Aproximación Regresión Unidad 3 Lis. Fuente: Autor.

La vida característica y la correlación cambia respecto a su valor inicial un 11.4953 % y 8.5638 % respectivamente. El tiempo medio entre fallas MTBF es igual a 125.67 horas, distanciándose del valor de referencia esta vez por solo el 6.75 %

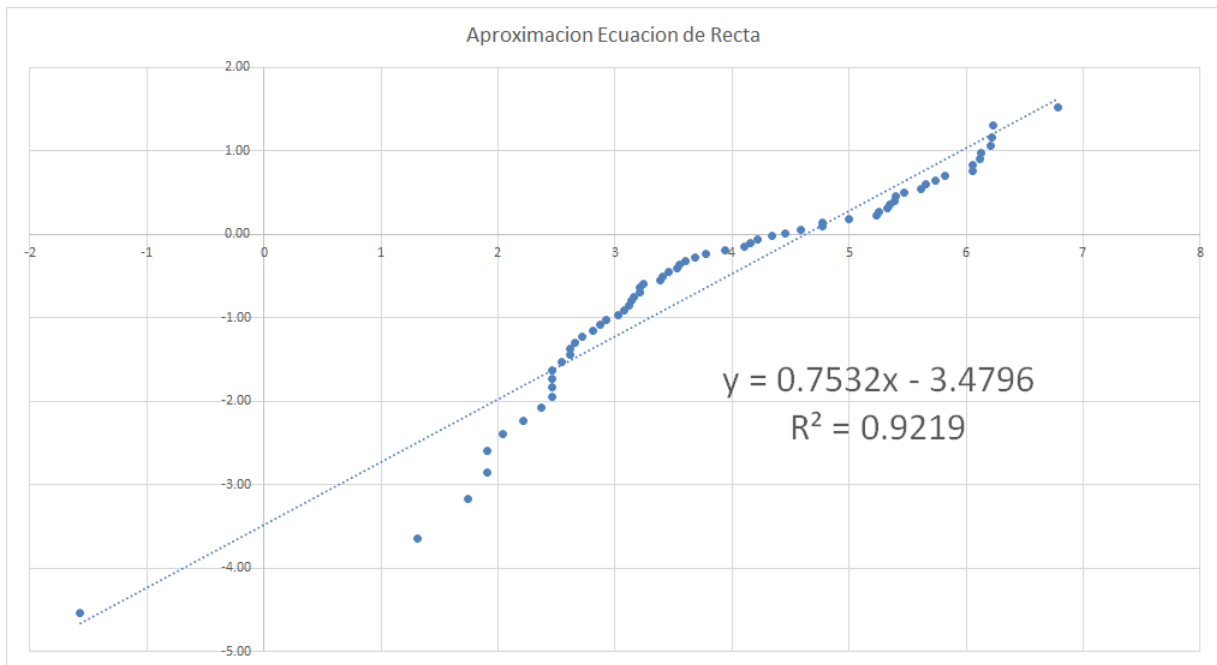


Figura 16: Regresión Lineal Unidad Compresora 3. Fuente Autor

4.5. Confiabilidad y tiempos medios de operación por Unidad Compresora

UNIDADES	METODO CONVENCIONAL		
	MTBF	MTTR	MTTF
3 LIS	134.77	31.37	103.40
	WEIBULL		
	125.67	23.06	86.81
	DIFERENCIA EN PORCENTAJE		
	6.75%	26.50%	16.05%
4 LIS	METODO CONVENCIONAL		
	1254.86	177.00	1077.86
	WEIBULL		
	1664.72	274.45	5340.43
	DIFERENCIA EN PORCENTAJE		
	32.66%	55.06%	395.47%
5 LIS	METODO CONVENCIONAL		
	265.45	36.52	228.94
	WEIBULL		
	246.49	17.74	227.07
	DIFERENCIA EN PORCENTAJE		
	7.14%	51.42%	0.82%
6 LIS	METODO CONVENCIONAL		
	461.05	310.53	150.53
	WEIBULL		
	313.41	141.62	163.34
	DIFERENCIA EN PORCENTAJE		
	32.02%	54.39%	8.51%
7 LIS	METODO CONVENCIONAL		
	438.00	8.35	429.65
	WEIBULL		
	588.06	8.70	621.69
	DIFERENCIA EN PORCENTAJE		
	34.26%	4.20%	44.70%

Tabla 11: Tiempos de Operación de cada componente

En la Tabla 11, son comparados los tiempos medios entre fallas, tiempos medios de reparación y tiempos medios a fallar calculados por el

método convencional referenciados en la Tabla 8 y por Weibull, también se muestra la diferencia en porcentaje respecto al método convencional.

Después de realizar los respectivos análisis Weibull de los tiempos medios entre falla, a fallar y de reparación, se procede a evaluar en el tiempo las confiabilidades de cada unidad compresora de la estación Lizama, los resultados varían dependiendo de la cantidad de muestras obtenidas para cada unidad, se puede apreciar que para las unidades con más eventos, la predicción de tiempos medios es mucho más precisa, en general se presenta muy poca diferencia en la confiabilidad de cada componente sea utilizando la distribución exponencial o por Weibull. Se grafican solo las primeras dos mil horas para apreciar mejor el comportamiento de las gráficas.

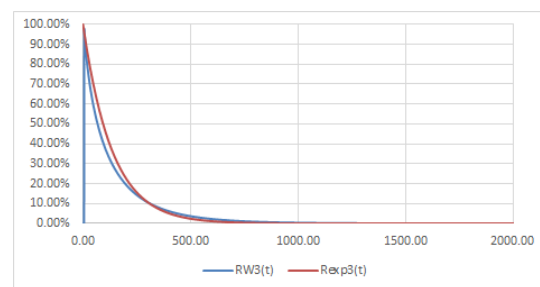


Figura 17: Confiabilidad de la Unidad 3 Lis. Fuente Autor

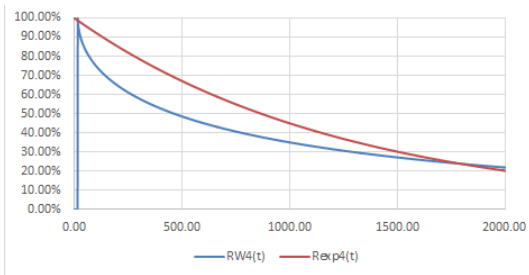


Figura 18: Confiabilidad de la Unidad 4 Lis.
Fuente Autor

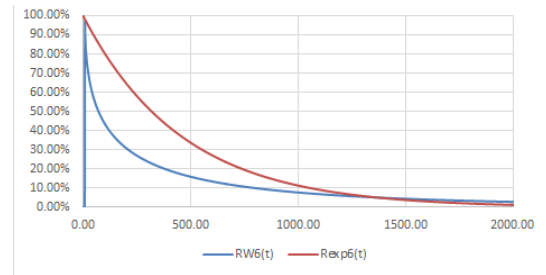


Figura 20: Confiabilidad de la Unidad 6 Lis.
Fuente Autor

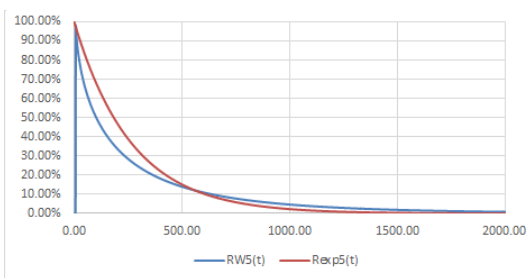


Figura 19: Confiabilidad de la Unidad 5 Lis.
Fuente Autor

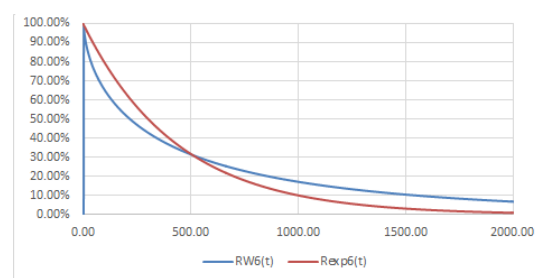


Figura 21: Confiabilidad de la Unidad 7 Lis.
Fuente Autor

Capítulo 5

MTBF del sistema modelado utilizando la distribución Weibull triparámetro para sistemas serie-paralelo.

5.1. Calcular MTBF del sistema utilizando el método convencional:

Antes de poder calcular el tiempo medio entre fallas aplicando Weibull, se requiere calcular el valor de referencia esperado. El modelo del sistema utilizado se describe en la Figura 10 y se explica matemáticamente en la sección 2.1.3.3, los tiempos medios de operación se calculan despejando las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4. Teniendo en cuenta que para que el sistema opere normalmente, tres unidades compresoras deben estar en funcionamiento.

5.1.1. Organizar información

Para la adecuada cuantificación se requiere organizar la información de tiempos operativos de las unidades en una hoja de calculo que permita realizar formulaciones lógicas que lleven a la determinación del numero de horas del día en el que el sistema estuvo operativo como se ilustra en la Tabla 12.

		3 Lis	4 Lis	5 Lis	6 Lis	7 Lis
FECHA CALENDARIO	MES	TTF	TTF	TTF	TTF	TTF
1/1/2015	ENERO	24	0	24	24	24
1/2/2015	ENERO	24	0	24	24	24
1/3/2015	ENERO	24	14	24	24	24
1/4/2015	ENERO	24	18	24	24	24
1/5/2015	ENERO	24	24	24	24	24
1/6/2015	ENERO	15	24	24	24	24
1/7/2015	ENERO	8	24	24	24	24
1/8/2015	ENERO	0	24	24	24	24
1/9/2015	ENERO	2	24	24	24	24
1/10/2015	ENERO	0	24	24	24	24
1/11/2015	ENERO	0	24	24	24	24
1/12/2015	ENERO	0	24	24	24	24
1/13/2015	ENERO	0	24	24	24	24
1/14/2015	ENERO	6	24	24	24	24
1/15/2015	ENERO	8	24	24	15	24

Tabla 12: Tiempos a Fallar de las Unidades del Sistema. Fuente Autor

5.1.2. Formulación lógica TTF, TTR y TBF Sistema Equivalente

Teniendo en cuenta que el valor más repetido en la Tabla 12., es 24 horas, se procede a cuantificar las unidades encendidas durante las 24 horas del día, de manera que se pueda filtrar la información dependiendo de el número de unidades operativas por día, siendo tres (3) el valor límite para que el sistema funcione con normalidad. Para el caso en que las unidades operativas sean tres (3) o más, se considera que el sistema operó normalmente durante 24 horas, de lo contrario se procede a cuantificar el tiempo en que simultáneamente tres unidades estuvieron operativas. El tiempo entre fallas se considera a la sumatoria de horas en las cuales el sistema se consideró no operativo y las horas que duró el sistema operativo hasta la falla inmediatamente posterior.

En la Tabla 14, se puede evidenciar que en 29 oportunidades en todo el año el sistema falló operacionalmente, para un tiempo total de 8760 horas, se determina que el tiempo operativo total fue de 8571 horas, el tiempo no-operacional fueron 189 horas, lo que significa que el tiempo medio a fallar es 295.55 horas, el tiempo medio entre reparación es de 6.52 horas y el tiempo medio entre fallas es de 302.07

METODO CONVENCIONAL		
MTBF	MTTR	MTTF
302.07	6.52	295.55

Tabla 13: Tiempos Medios entre fallas, reparación y a fallar del sistema Fuente Autor

		3 Lis	4 Lis	5 Lis	6 Lis	7 Lis	SISTEMA EQUIVALENTE		
FECHA CALENDARIO	MES	TTF	TTF	TTF	TTF	TTF	TTF	TTR	TBF
1/1/2015	ENERO	24	0	24	24	24	24	0	526
1/22/2015	ENERO	0	22	24	17	24	22	2	663
2/19/2015	FEBRERO	0	13	0	24	24	13	11	47
2/21/2015	FEBRERO	8	24	0	12	24	12	12	71
2/24/2015	FEBRERO	11	24	0	11	24	11	13	22
2/25/2015	FEBRERO	3	24	0	9	24	9	15	29
2/26/2015	FEBRERO	0	24	0	14	24	14	10	105
3/2/2015	MARZO	0	24	0	23	24	23	1	22
3/3/2015	MARZO	0	24	0	21	24	21	3	15
3/4/2015	MARZO	0	24	0	12	24	12	12	338
3/18/2015	MARZO	12	24	0	24	14	14	10	583
4/11/2015	ABRIL	0	19	21	24	24	21	3	24
4/12/2015	ABRIL	15	0	21	24	24	21	3	622
5/8/2015	MAYO	19	0	24	1	19	19	5	51
5/10/2015	MAYO	24	0	24	0	22	22	2	5
5/11/2015	MAYO	24	0	24	0	3	3	21	54
5/13/2015	MAYO	24	0	9	0	24	9	15	1538
7/16/2015	JULIO	6	24	24	0	11	11	13	537
8/7/2015	AGOSTO	20	24	24	0	9	20	4	433.5
8/25/2015	AGOSTO	24	24	21.5	0	20	21.5	2.5	740.5
9/25/2015	SEPTIEMBRE	17	24	18	0	24	18	6	29
9/26/2015	SEPTIEMBRE	23	24	22	0	24	23	1	19
9/27/2015	SEPTIEMBRE	18	24	14	0	24	18	6	581
10/21/2015	OCTUBRE	15	24	23	0	24	23	1	72
10/24/2015	OCTUBRE	4	24	23	0	24	23	1	383.5
11/9/2015	NOVIEMBRE	24	24	15	0	22.5	22.5	1.5	21.5
11/10/2015	NOVIEMBRE	24	24	0	0	20	20	4	48
11/12/2015	NOVIEMBRE	20	24	9	0	24	20	4	242
11/22/2015	NOVIEMBRE	3	24	22	0	24	22	2	549
12/15/2015	DICIEMBRE	17	19	24	0	24	19	5	389

Tabla 14: Tiempos de Operación, Reparación y entre fallas Sistema Equivalente. Fuente Autor

horas.

5.2. Evaluar el Modelo de Confiabilidad

Posterior al cálculo de los valores de referencia de todo el sistema, se procede a evaluar el modelo de confiabilidad del sistema teniendo en cuenta los valores calculados con el método convencional y por el análisis de Weibull.

5.2.1. Modelo Utilizado

El modelo que mejor representa el sistema es el M-out-of-N, el cual requiere que para N componentes activos u operables, por lo menos M operen con normalidad para que el sistema funcione, la forma de la confiabilidad es expresada por la ecuación 2.5. Dicho modelo requiere

que los componentes sean idénticos e independientes, ya que no es posible que cada unidad compresora posea la misma confiabilidad que sus pares se toma un promedio de las cinco confiabilidades para emular componentes idénticos.

5.2.2. Evaluación del Modelo

Tras evaluar las confiabilidades en un tiempo determinado, se despeja la ecuación 2.5, siendo $n = 5$, la confiabilidad promedio de las componentes evaluadas en el tiempo $t = MTTF = 295,55h$ calculadas por la distribución exponencial igual a 45.32%, como se ilustra en la Tabla 15, la confiabilidad equivalente esta dada por la sumatoria entre $j = 3$ y n que es igual a 41.283%, como se ilustra en la Tabla 16.

	3 Lis	4 Lis	5 Lis	6 Lis	7 Lis
R _{exp}	11.16%	79.02%	32.84%	52.67%	50.93%
R<exp>	45.32%				

Tabla 15: Confiabilidad Promedio Componentes del Sistema Método Convencional. Fuente Autor

j	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
$\frac{n!}{(n-j)!j!}$	5.00	10.00	10.00	5.00	1.00
R^j	0.45	0.21	0.09	0.04	0.02
$(1 - R)^{n-j}$	0.08937	0.16345	0.29895	0.54676	1.00000
$\frac{n!}{(n-j)!j!} * R^j * (1 - R)^{n-j}$	0.20253	0.33577	0.27834	0.11537	0.01913
$R_{m/n}$	41.283%				

Tabla 16: Confiabilidad Equivalente Método Convencional. Fuente Autor

Evaluando las confiabilidades de los componentes determinadas por Weibull donde $t = MTTF = 295,55h$ se encuentra que la confiabilidad promedio es 32.34% (Tabla 17), la confiabilidad equivalente es del 19.536%, diferenciándose del valor de la confiabilidad calculada utilizando la distribución exponencial 21.75%, como se puede apreciar en la Tabla 18.

	3 Lis	4 Lis	5 Lis	6 Lis	7 Lis
R _{Weibull}	11.00%	58.31%	24.71%	24.21%	43.46%
Ri<Weibull>	32.34%				

Tabla 17: Confiabilidad Promedio Componentes del Sistema utilizando Weibull. Fuente Autor

j	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
$\frac{n!}{(n-j)!j!}$	5.00	10.00	10.00	5.00	1.00
R^j	0.3234	0.1046	0.0338	0.0109	0.0035
$(1-R)^{n-j}$	0.20959	0.30976	0.45781	0.67661	1.00000
$\frac{n!}{(n-j)!j!} * R^j * (1-R)^{n-j}$	0.33889	0.32394	0.15483	0.03700	0.00354
$R_{m/n}$	19.536%				

Tabla 18: Confiabilidad Equivalente Utilizando Weibull. Fuente Autor

5.3. Confiabilidad Sistema Modelado Distribución Exponencial

5.3.1. Evaluar Confiabilidad en el tiempo por componente

Teniendo en cuenta los tiempos medios entre fallas previamente determinados para cada componente del sistema, se calcula la tasa de fallos y se evalúa para cada componente la confiabilidad en el tiempo desde $t = 0$ hasta $t = 8760$ horas. Los parámetros para cada componente se muestran en la Tabla 19. La confiabilidad en función del tiempo para la distribución exponencial, se puede expresar como muestra en la ecuación 2.1.

	3 Lis	4 Lis	5 Lis	6 Lis	7 Lis
MTBF	134.77	1254.86	265.45	461.05	438.00
λ	0.007	0.001	0.004	0.002	0.002

Tabla 19: Parámetros distribución Exponencial. Fuente Autor

t	R3(t)	R4(t)	R5(t)	R6(t)	R7(t)
0.00	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
1.00	99.26%	99.92%	99.62%	99.78%	99.77%
2.00	98.53%	99.84%	99.25%	99.57%	99.54%
3.00	97.80%	99.76%	98.88%	99.35%	99.32%
4.00	97.08%	99.68%	98.50%	99.14%	99.09%
5.00	96.36%	99.60%	98.13%	98.92%	98.86%
6.00	95.65%	99.52%	97.77%	98.71%	98.64%
7.00	94.94%	99.44%	97.40%	98.49%	98.41%
8.00	94.24%	99.36%	97.03%	98.28%	98.19%
9.00	93.54%	99.29%	96.67%	98.07%	97.97%
10.00	92.85%	99.21%	96.30%	97.85%	97.74%
11.00	92.16%	99.13%	95.94%	97.64%	97.52%
12.00	91.48%	99.05%	95.58%	97.43%	97.30%
13.00	90.80%	98.97%	95.22%	97.22%	97.08%
14.00	90.13%	98.89%	94.86%	97.01%	96.85%
15.00	89.47%	98.81%	94.51%	96.80%	96.63%
16.00	88.81%	98.73%	94.15%	96.59%	96.41%
17.00	88.15%	98.65%	93.80%	96.38%	96.19%
18.00	87.50%	98.58%	93.44%	96.17%	95.97%
19.00	86.85%	98.50%	93.09%	95.96%	95.75%
20.00	86.21%	98.42%	92.74%	95.75%	95.54%
21.00	85.57%	98.34%	92.39%	95.55%	95.32%
22.00	84.94%	98.26%	92.05%	95.34%	95.10%
23.00	84.31%	98.18%	91.70%	95.13%	94.88%
24.00	83.69%	98.11%	91.36%	94.93%	94.67%

Tabla 20: Confiabilidad en el tiempo para cada Componente Distribución Exponencial. Fuente Autor

5.3.2. Aplicar Modelo Confiabilidad M-out-of-N

Se evalúa el modelo M-out-of-N, el cual determina una confiabilidad equivalente para el sistema, . En la Tabla 21 se puede apreciar la confiabilidad equivalente en el tiempo para la distribución exponencial (primeras 24 horas). En la Figura 22, se puede apreciar las confiabilidades evaluadas en el tiempo y la confiabilidad equivalente para el sistema, se grafica solo las primeras 2000 horas para apreciar en detalle el comportamiento de las gráficas.

t	R3(t)	R4(t)	R5(t)	R6(t)	R7(t)	Re(t)
0.00	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.000%
1.00	99.26%	99.92%	99.62%	99.78%	99.77%	100.000%
2.00	98.53%	99.84%	99.25%	99.57%	99.54%	100.000%
3.00	97.80%	99.76%	98.88%	99.35%	99.32%	99.999%
4.00	97.08%	99.68%	98.50%	99.14%	99.09%	99.998%
5.00	96.36%	99.60%	98.13%	98.92%	98.86%	99.996%
6.00	95.65%	99.52%	97.77%	98.71%	98.64%	99.993%
7.00	94.94%	99.44%	97.40%	98.49%	98.41%	99.989%
8.00	94.24%	99.36%	97.03%	98.28%	98.19%	99.983%
9.00	93.54%	99.29%	96.67%	98.07%	97.97%	99.977%
10.00	92.85%	99.21%	96.30%	97.85%	97.74%	99.969%
11.00	92.16%	99.13%	95.94%	97.64%	97.52%	99.959%
12.00	91.48%	99.05%	95.58%	97.43%	97.30%	99.947%
13.00	90.80%	98.97%	95.22%	97.22%	97.08%	99.933%
14.00	90.13%	98.89%	94.86%	97.01%	96.85%	99.918%
15.00	89.47%	98.81%	94.51%	96.80%	96.63%	99.900%
16.00	88.81%	98.73%	94.15%	96.59%	96.41%	99.880%
17.00	88.15%	98.65%	93.80%	96.38%	96.19%	99.858%
18.00	87.50%	98.58%	93.44%	96.17%	95.97%	99.833%
19.00	86.85%	98.50%	93.09%	95.96%	95.75%	99.806%
20.00	86.21%	98.42%	92.74%	95.75%	95.54%	99.776%
21.00	85.57%	98.34%	92.39%	95.55%	95.32%	99.744%
22.00	84.94%	98.26%	92.05%	95.34%	95.10%	99.709%
23.00	84.31%	98.18%	91.70%	95.13%	94.88%	99.672%
24.00	83.69%	98.11%	91.36%	94.93%	94.67%	99.631%

Tabla 21: Modelo Aplicado a primeras 24 horas Distribución Exponencial. Fuente Autor

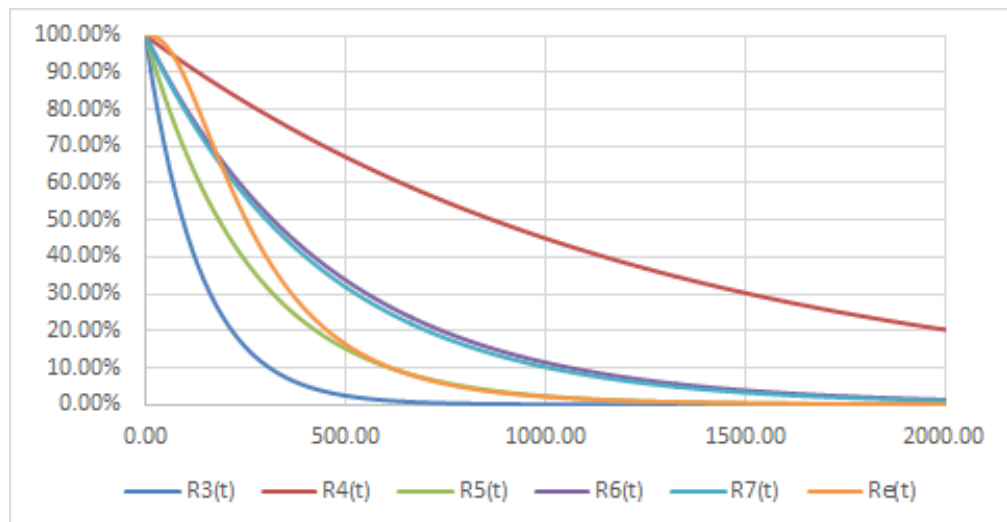


Figura 22: Confiabilidades Exponenciales del Sistema. Fuente Autor

5.3.3. Cálculo MTBF del Sistema a partir de la distribución exponencial equivalente.

Posterior a la evaluación y determinación de la confiabilidad equivalente del sistema, por medio de una regresión exponencial se calcula el tiempo medio entre fallas equivalente. La pendiente de dicha regresión es la tasa de fallos, la cual es el inverso del MTBF. En la Tabla 23, se pueden apreciar las componentes de la regresión exponencial y en la Tabla 22 se puede apreciar que el tiempo medio entre fallas equivalente para la distribución exponencial es de $MTBF = 390,165h$, diferenciándose 29.16% del valor de referencia $MTBF = 302,069h$.

t	Xe=t	Ye=Ln(Re(t))
0.00	0.00	0.00000000
1.00	1.00	-0.00000035
2.00	2.00	-0.00000277
3.00	3.00	-0.00000925
4.00	4.00	-0.00002165
5.00	5.00	-0.00004179
6.00	6.00	-0.00007134
7.00	7.00	-0.00011193
8.00	8.00	-0.00016508
9.00	9.00	-0.00023225
10.00	10.00	-0.00031481
11.00	11.00	-0.00041405
12.00	12.00	-0.00053120
13.00	13.00	-0.00066742
14.00	14.00	-0.00082380
15.00	15.00	-0.00100138
16.00	16.00	-0.00120112
17.00	17.00	-0.00142393
18.00	18.00	-0.00167067
19.00	19.00	-0.00194214
20.00	20.00	-0.00223909
21.00	21.00	-0.00256223
22.00	22.00	-0.00291222
23.00	23.00	-0.00328965
24.00	24.00	-0.00369510

Figura 23: Regresión Exponencial Sistema Modelado. Fuente Autor

MTBF	390.165
λ	0.00256

Tabla 22: MTBF y Tasa de Fallos de la Confiabilidad Equivalente Distribución Exponencial. Fuente Autor

5.4. Análisis de Weibull Sistema Modelado

5.4.1. Evaluar Confiabilidad en el tiempo por componente

Teniendo en cuenta los parámetros de forma, escala y localización previamente determinados a través del análisis de Weibull triparámetro para cada componente del sistema, se evalúa para cada componente la confiabilidad en el tiempo de Weibull desde $t = 0$ hasta $t = 8760$ horas. Los parámetros para cada componente se muestran en la Tabla 23. La confiabilidad en función de los parámetros Weibull y el tiempo, se puede expresar como muestra en la ecuación 2.7.

	3 Lis	4 Lis	5 Lis	6 Lis	7 Lis
Beta	0.753	0.526	0.633	0.474	0.607
Eta	101.460	900.886	169.662	137.011	394.361
Localizacion	5.292	16.967	7.595	8.882	3.479

Tabla 23: Parámetros Weibull para cada Componente del Sistema. Fuente Autor

t	R3(t)	R4(t)	R5(t)	R6(t)	R7(t)
0.00					
1.00					
2.00					
3.00					
4.00					98.23%
5.00					96.63%
6.00	97.65%				95.45%
7.00	95.49%				94.46%
8.00	93.68%		97.84%		93.58%
9.00	92.06%		95.31%	96.53%	92.78%
10.00	90.57%		93.47%	90.25%	92.04%
11.00	89.19%		91.92%	87.04%	91.36%
12.00	87.88%		90.56%	84.64%	90.71%
13.00	86.63%		89.33%	82.68%	90.09%
14.00	85.44%		88.19%	80.99%	89.51%
15.00	84.30%		87.13%	79.50%	88.95%
16.00	83.21%		86.14%	78.15%	88.41%
17.00	82.15%	99.54%	85.20%	76.93%	87.89%
18.00	81.13%	97.20%	84.30%	75.79%	87.39%
19.00	80.14%	96.03%	83.44%	74.74%	86.91%
20.00	79.18%	95.12%	82.62%	73.75%	86.44%
21.00	78.24%	94.35%	81.83%	72.83%	85.98%
22.00	77.34%	93.68%	81.07%	71.95%	85.54%
23.00	76.45%	93.07%	80.33%	71.11%	85.10%
24.00	75.59%	92.51%	79.62%	70.32%	84.68%

Tabla 24: Confiabilidad en el tiempo para cada Componente Distribución Weibull. Fuente Autor

5.4.2. Aplicar Modelo Confiabilidad M-out-of-N

Se evalúa el modelo M-out-of-N, el cual determina una confiabilidad equivalente para el sistema. En la Tabla 25 se puede apreciar la confiabilidad equivalente en el tiempo (primeras 24 horas), ya que la confiabilidad de cada componente solo se puede evaluar después de que el tiempo supere el parámetro localización, es de esperarse que el modelo equivalente desprecie el tiempo antes del mas largo de los parámetros localización de todo el sistema. La confiabilidad equivalente para el sistema se puede apreciar en la Figura 24, se grafican solo las primeras 2000 horas para apreciar en detalle el comportamiento de las gráficas.

t	R3(t)	R4(t)	R5(t)	R6(t)	R7(t)	Re(t)
0.00						
1.00						
2.00						
3.00						
4.00					98.23%	
5.00					96.63%	
6.00	97.65%				95.45%	
7.00	95.49%				94.46%	
8.00	93.68%		97.84%		93.58%	
9.00	92.06%		95.31%	96.53%	92.78%	
10.00	90.57%		93.47%	90.25%	92.04%	
11.00	89.19%		91.92%	87.04%	91.36%	
12.00	87.88%		90.56%	84.64%	90.71%	
13.00	86.63%		89.33%	82.68%	90.09%	
14.00	85.44%		88.19%	80.99%	89.51%	
15.00	84.30%		87.13%	79.50%	88.95%	
16.00	83.21%		86.14%	78.15%	88.41%	
17.00	82.15%	99.54%	85.20%	76.93%	87.89%	97.945%
18.00	81.13%	97.20%	84.30%	75.79%	87.39%	97.417%
19.00	80.14%	96.03%	83.44%	74.74%	86.91%	96.958%
20.00	79.18%	95.12%	82.62%	73.75%	86.44%	96.501%
21.00	78.24%	94.35%	81.83%	72.83%	85.98%	96.040%
22.00	77.34%	93.68%	81.07%	71.95%	85.54%	95.572%
23.00	76.45%	93.07%	80.33%	71.11%	85.10%	95.098%
24.00	75.59%	92.51%	79.62%	70.32%	84.68%	94.617%

Tabla 25: Modelo Aplicado a primeras 24 horas. Fuente Autor

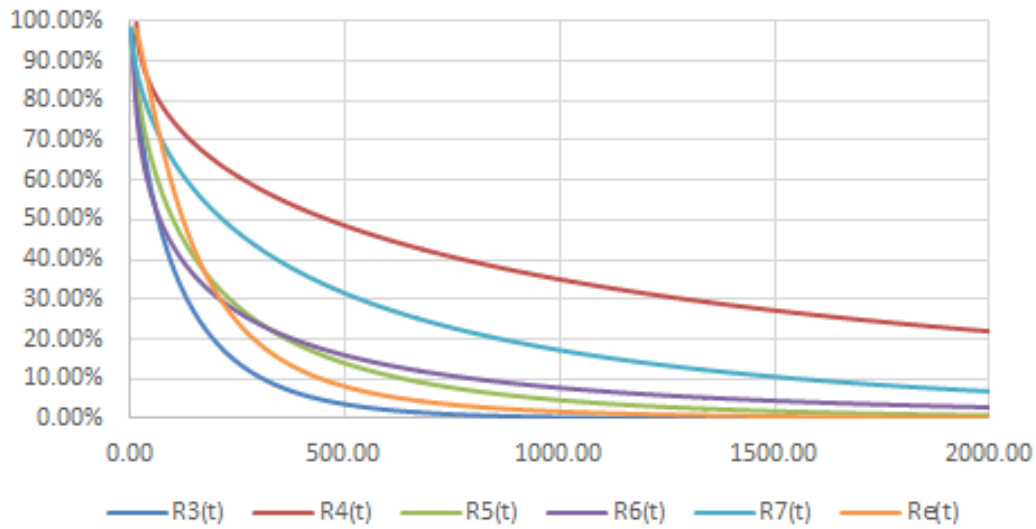


Figura 24: Confiabilidades Weibull del Sistema. Fuente Autor

5.4.3. Análisis de Weibull Triparámetro

Posterior al modelado de confiabilidad, se calcula una probabilidad de falla en el tiempo y se aplica Weibull triparámetro para calcular los parámetros de forma, escala y localización de Weibull equivalentes para todo el sistema, permitiendo calcular tiempos medios entre fallas. En la Tabla 27 se pueden apreciar las componentes X y Y de la regresión lineal de Weibull, la cual se grafica en la figura 25, se determinan los parámetros de Weibull $\beta = 0,605$, $\eta = 119,611$ y $\delta = 18,849$, para dichos parámetros, $MTBF = 196,724h$, diferenciándose 34.87% del valor de referencia $MTBF = 302,069h$.

MTBF	196.724
Beta	0.605
Intercepto	-2.897
Eta	119.611
R2	0.975
Localizacion	18.849

Tabla 26: MTBF y Parámetros Weibull Sistema Modelado. Fuente Autor

t	Re(t)	Fe(t)	t-δ	Xe=Ln(t)	Ye=Ln(-Ln(1-F(t)))
0.00			-18.85		
1.00			-17.85		
2.00			-16.85		
3.00			-15.85		
4.00			-14.85		
5.00			-13.85		
6.00			-12.85		
7.00			-11.85		
8.00			-10.85		
9.00			-9.85		
10.00			-8.85		
11.00			-7.85		
12.00			-6.85		
13.00			-5.85		
14.00			-4.85		
15.00			-3.85		
16.00			-2.85		
17.00	97.945%	2.06%	-1.85		-3.87
18.00	97.417%	2.58%	-0.85		-3.64
19.00	96.958%	3.04%	0.15	-1.89	-3.48
20.00	96.501%	3.50%	1.15	0.14	-3.34
21.00	96.040%	3.96%	2.15	0.77	-3.21
22.00	95.572%	4.43%	3.15	1.15	-3.09
23.00	95.098%	4.90%	4.15	1.42	-2.99
24.00	94.617%	5.38%	5.15	1.64	-2.89

Tabla 27: Regresión Weibull Sistema Modelado. Fuente Autor

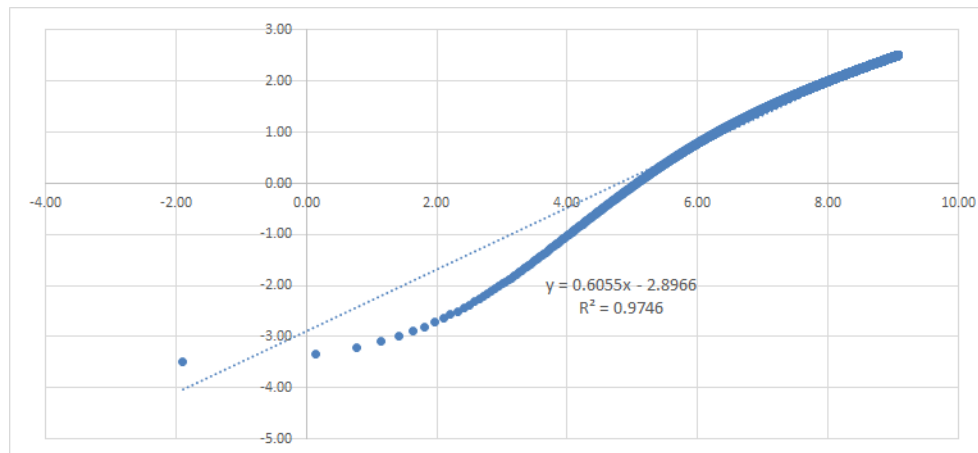


Figura 25: Aproximación Regresión Sistema Modelado. Fuente Autor

5.5. Comparación MTBF, Confiabilidad Exponencial y Confiabilidad Weibull

Luego de calcular los tiempos medios entre fallas del sistema y sus equivalentes según las distribuciones exponenciales y Weibull, se grafican las confiabilidades equivalentes y se comparan con la confiabilidad exponencial tomando $MTBF = 302,069h$. En la Figura 26, se puede apreciar el comportamiento de las diferentes confiabilidades equivalentes para el sistema, siendo $R_{We}(t)$ la confiabilidad equivalente en el tiempo según la distribución Weibull, $R_{expe}(t)$ la confiabilidad equivalente en el tiempo según la distribución exponencial y $R(t)$ la confiabilidad exponencial en el tiempo tomando $MTBF = 302,069h$. En la Figura 27, se puede apreciar que para antes de las primeras 527 horas el sistema modelado utilizando la distribución exponencial es mucho mas preciso que la distribución Weibull, pero después de dicho tiempo la distribución Weibull supera en precisión a la exponencial.

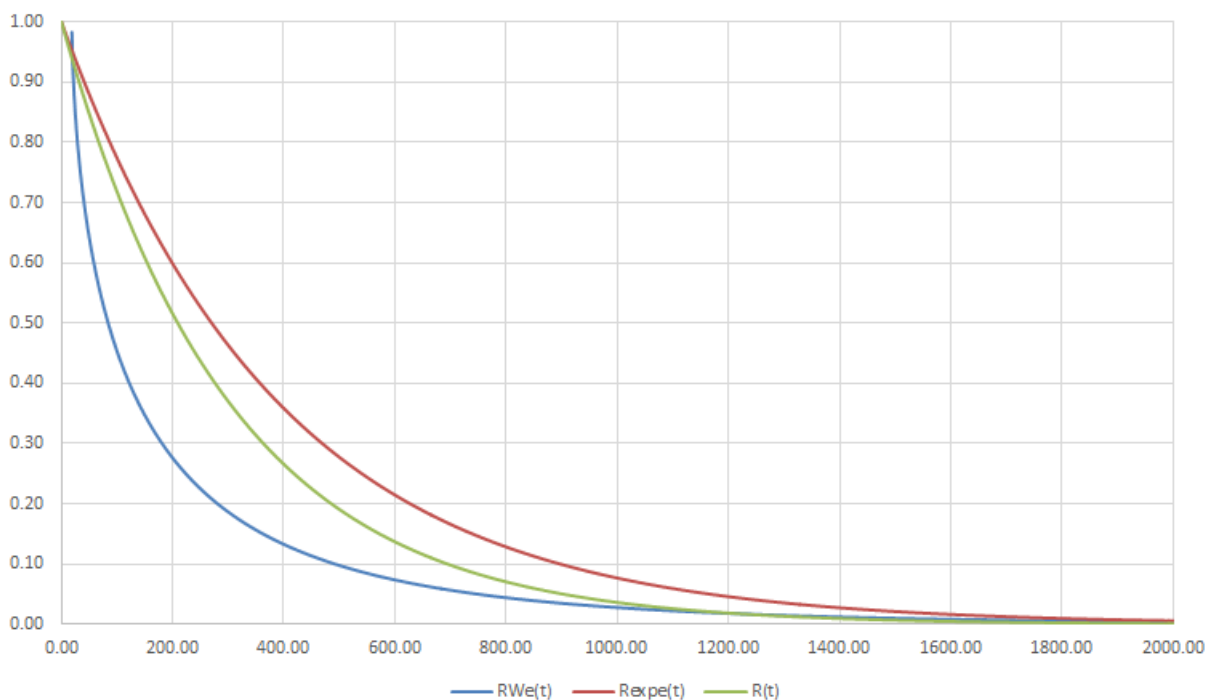


Figura 26: Confiabilidades del Sistema. Fuente Autor

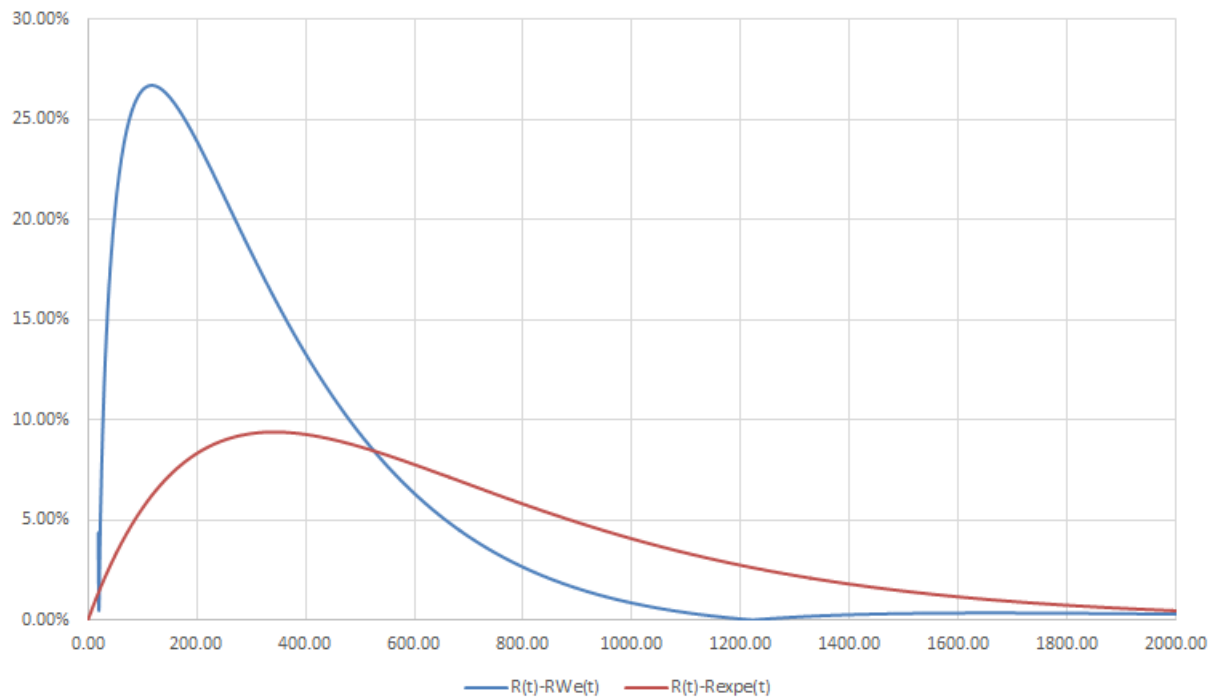


Figura 27: Diferencia Absoluta en las distribuciones Exponencial y Weibull respecto al valor de referencia. Fuente Autor

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- El sistema es confiable, ya que tiene diseñado un modelo de interconexión M-out-of-N o redundancia M de N, el cual utiliza el respaldo del modelo paralelo para evitar la dependencia de una unidad sobre otra.
- El sistema es viable ya que para cada N unidades activas se requieren M unidades en operación, siendo M igual a tres y N igual a cinco, de no cumplirse esta premisa se incurre en falla funcional, ya que no podrá cumplir con la entrega del caudal de gas requerido en la frontera de salida.
- La distribución Weibull comparada con otras distribuciones como la exponencial, muestra una mayor precisión al describir la confiabilidad de sistema a partir de las confiabilidades de sus componentes para el mediano plazo (500h en adelante como se muestra en la Figura 27), pero muestra una diferencia muy alta antes de dicho tiempo, por lo cual no es recomendable para planear tiempos de intervención frecuentes.
- El sistema de Weibull modelado no logra describir tiempos entre falla con precisión, se requeriría una mayor cantidad de datos de falla de cada unidad para así disminuir la desviación estándar de la muestra.
- El análisis de Weibull triparámetro muestra para los tiempos medios entre falla una precisión proporcional al número de muestras, siendo para las unidades tres y cinco (65 y 33 fallas respectivamente), ya que para los mismos datos la diferencia entre el método convencional y Weibull es inferiores al 8%.

6.2. Trabajos futuros

- La herramienta Weibull ha probado ser útil para múltiples disciplinas, la recopilación constante de datos y la constante retroalimentación podrían llevar a una mejor predicción de tiempos de inspección, confiabilidad, disponibilidad que ayudarían estimar mejores estrategias de mantenimiento.
- Se recomienda aplicar este modelo para diversas empresas o industrias que tengan procesos donde se requiere asegurar la confiabilidad en las entregas de productos basados en cantidades constantes. El modelo está enfocado en mitigar pérdidas en las entregas de productos a los diferentes clientes, evitando alteraciones en la producción de plantas o procesos externos dependientes del mismo

Bibliografía

Marco normativo de referencia para la certificación de gestores en mantenimiento y confiabilidad. URL http://www.aciem.org/home/images/CDN/CGMC_ACIEM/Marco_Normativo.pdf.

Manual de operación de la Planta compresora de gas Lisama.

The weibull distribution. URL http://reliawiki.org/index.php/The_Weibull_Distribution.

Iso 14224:2006, 2006. URL <https://www.iso.org/standard/36979.html>.

Reliability hotwire-the emagazine for the reliability professional, Octubre 2007. URL <http://www.weibull.com/hotwire/issue80/tooltips80.htm>.

Iso 55001:2014, 2014. URL <https://calidadgestion.wordpress.com/2015/12/18/iso-550012014-gestion-de-activos/>.

Dr. R. B. Abernethy, J. E. Breneman, and G.L Flainman C. H. Medlin. *Weibull Analisis Handbook*. Pratt & Whitney Aircraft Government Products Division, West Palm Beach, Florida 3-4Z2, 1984. URL <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a143100.pdf>.

Zohra Benkamra, Mekki Terbeche, and Mounir Tlemcan. Bayesian sequential estimation of the reliability of a parallel-series system. *ELSEVIER*, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2013.05.010>.

Alessandro Birolini. *Reliability Engineering Theory and Practice*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2006.

Wallace R. Blischke. *Case Studies in Reliability and Maintenance*. A JOHN WILEY & SONS PUBLICATION, 2003.

José Manuel Tamborero del Pino. Fiabilidad: la distribución de weibull, 1994. URL http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_331.pdf.

- B. S Dhillon. *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. CRC Press Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, 2006.
- Bryan Dodson. *The Weibull Analysis Handbook*, volume 2da ed. ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, 2006.
- Salih O. Duffuaa, A. Raouf, and John Dixon Campbell. *Sistemas de Mantenimiento Planeación y Control*. Limusa Wiley, 2006.
- MSc. José Bernardo Durán. Gestión de mantenimiento bajo estándares internacionales como pas 55 asset management. *The Woodhouse Partnership Ltd*, 2011. URL <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/PAS55.pdf>.
- Emad E. Elmahdy. A new approach for weibull modeling for reliability life data analysis. *ELSEVIER*, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.10.036>.
- Dimitri Kececioglu. *Reliability Engineering Handbook*. DEStech Publications, Inc, 2002.
- Eduardo Romero López. Estudio de mejora del mantenimiento mediante la aplicación de la distribución de weibull a un histórico de fallos. UNED PROYECTO FIN DE POSTGRADO, Septiembre 2012. URL <https://es.slideshare.net/EduardoRL2/pfpg>.
- Raquel Salazar Moreno, Abraham Rojano Aguilar, Esther Figueroa Hernández, and Francisco Pérez Soto. Aplicaciones de la distribución weibull en ingeniería de confiabilidad. In *Memoria del XXI Coloquio Mexicano de Economía Matemática y Econometría*, 2013. URL <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013/1255/aplicaciones-distribucion-weibull-ingenieria-confiabilidad.pdf>.
- M Nosal, AH Legge, and SV Krupa. Application of a stochastic, weibull probability generator for replacing missing data on ambient concentrations of gaseous pollutants. *ELSEVIER*, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00220-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00220-1).
- Luis Hernando Palacio. Cálculo de los parámetros de la distribución de weibull. *Mantenimiento en Latinoamérica*, Volumen 7, Abril 2015. URL <http://mantenimientoenlatinoamerica.com/pdf/ML%20Volumen%207-2.pdf>. ISSN 2357-6840.
- Karol Quintero. Aseguramiento de la medición de gases de el centro y de herramientas de seguimiento operativo en el departamento de materias primas y productos, 2010.
- H. Hasan Örcü, Ertugrul Aksoy, and Mustafa Isa Doga. Estimating the parameters of 3-p weibull distribution through differential evolution. *ELSEVIER*, 2015. <http://dx.doi.org/>

10.1016/j.amc.2014.10.127.

Hernando Vera. Aplicación de la metodología análisis de causa raíz (rca), para la eliminación de un mal actor en equipos críticos de la som ecopetrol sa, 2011.