

**CALCULO DE LOS 3 PARÁMETROS WEIBULL USANDO EL HISTORIAL DE
FALLA DE UNA BANDA TRANSPORTADORA**

MONOGRAFÍA

BRANDON LEONEL MANTILLA CAICEDO

ID: 000244080

Director

M.SC. EMIL HERNÁNDEZ ARROYO

ESPECIALIZACIÓN DE GERENCIA DE MANTENIMIENTO Y

CONFIABILIDAD

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

BUCARAMANGA

2020

Dedicatoria

La presente investigación va dedicada a Dios por el maravilloso regalo de la vida, también a mis padres Martha Cecilia Caicedo y Leonel Augusto Mantilla por apoyarme y quererme de manera incondicional, así como mis tíos Tulio García Y Armando Mantilla por ser mis segundos padres y guías en la vida.

Agradecimientos

Agradezco en gran medida de forma general a todas las personas que aportaron y facilitaron el desarrollo de este proyecto.

Al ing. Emil Hernández Arroyo por su compromiso y dedicación durante todo el proceso

Al ing. José Osvaldo Monroy Villareal quien es una excelente persona, un gran hermano incondicional en el camino de la vida.

Tabla de Contenidos

1. Introducción	9
2. Situación problemática	10
3. Justificación	11
4. Objetivos	12
4.1 Objetivo General	12
4.1.1 Objetivos específicos	12
5. Marco referencial	13
5.1 Concepto de mantenimiento	13
5.1.1 Tipos de mantenimiento.....	13
5.1.1.1.1 Mantenimiento correctivo.....	13
5.1.1.1.2 Mantenimiento preventivo	14
5.1.1.1.3 Mantenimiento predictivo.....	14
5.1.1.1.3.1 Inspecciones visuales.....	14
5.1.1.1.3.2 Líquidos penetrantes	15
5.1.1.1.3.3 Ensayo ultrasónico.....	15
5.1.1.1.3.4 Corrientes de Eddy.....	16
5.1.1.1.3.5 Estudios termográficos.....	16
5.1.1.1.3.6 Análisis de lubricantes	16
5.2 Indicadores de mantenimiento KPI.....	17

	5
5.2.1 Características de los indicadores	17
5.2.2 Indicadores clase mundo	18
5.2.2.1 Disponibilidad	18
5.2.2.2 Mantenibilidad	19
5.2.2.3 MTBF o TMEP (tiempo medio entre paradas)	19
5.2.2.4 MTTR (tiempo medio para reparar)	19
5.2.2.5 MTBF (tiempo medio entre fallas)	20
6 Método de momentos	23
6.1 Método de momentos empleando la distribución Weibull	24
6.2 Aplicación del método de momentos para los TBF de la banda transportadora	25
7. Aplicación del método grafico para los TBF de la banda transportadora	28
8. Curvas de confiabilidad	34
9. Prueba de bondad de Kolmogórov-Smirnov	36
10. Comparación de los métodos	39
11. Conclusiones	41
12. Bibliografía	43

Lista de tablas

Tabla 1 Tiempo medio entre fallas de la banda transportadora

Tabla 2 Valores de las variables para hallar K

Tabla 3 Proceso de iteración

Tabla 4 Valores TBF para el método grafico

Tabla 5 valores de los puntos para el método grafico

Tabla 6 Datos para la confiabilidad y no confiabilidad

Tabla 7 Datos de ajuste de Kolmogórov-Smirnov

Tabla 8 Función acumulada de Weibull

Tabla 9 Comparación de parámetros Weibull de ambos métodos

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: CALCULO DE LOS 3 PARÁMETROS WEIBULL USANDO EL HISTORIAL DE FALLA DE UNA BANDA TRANSPORTADORA

AUTOR(ES): Brandon Leonel Mantilla Caicedo

PROGRAMA: Esp. en Gerencia De Mantenimiento Y Confiabilidad

DIRECTOR(A): Emil Hernández Arroyo

RESUMEN

La presente investigación trata sobre el análisis del comportamiento de una banda transportadora analizando los TBF (tiempos medios entre fallas) a fin de estimar su comportamiento empleando dos métodos de cálculos de parámetros Weibull, por consiguiente el primer método es conocido como el análisis de momentos muestrales de una determinada población (TBF), el segundo método propone analizar el comportamiento tratando los datos de manera grafica con una serie de ecuaciones de ajuste que permiten acomodar los datos para hallar los parámetros con el fin de determinar la confiabilidad, adicionalmente, se realiza una prueba de bondad ajuste de smirnov kolmogorov para corroborar que la distribución Weibull es la indicada para la naturaleza de los tiempos medios entre falla.

PALABRAS CLAVE:

Distribución Weibull, TBF, Confiabilidad,

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: CALCULATION OF THE 3 WEIBULL PARAMETERS USING THE FAILURE HISTORY OF A CONVEYOR BELT

AUTHOR(S): Brandon Leonel Mantilla Caicedo

FACULTY: Esp. en Gerencia De Mantenimiento Y Confiabilidad

DIRECTOR: Emil Hernández Arroyo

ABSTRACT

The present research deals with the analysis of the behavior of a conveyor belt by analyzing the TBF (mean times between failures) in order to estimate its behavior using two methods of calculating Weibull parameters, therefore the first method is known as the analysis of sample moments of a certain population (TBF), the second method proposes to analyze the behavior by treating the data graphically with a series of adjustment equations that allow accommodating the data to find the parameters in order to determine the reliability, additionally, a smirnov kolmogorov goodness-fit test to corroborate that the Weibull distribution is the one indicated for the nature of the mean times between failure.

KEYWORDS:

Weibull distribution, TBF, Reliability, Weibull distribution, TBF, Reliability,

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. Introducción

El mundo del mantenimiento se encuentra en una constante investigación buscando cada vez más introducir los conceptos de la confiabilidad como herramienta gestora de control de las actividades a fin de impactar positivamente en temas financieros, en consideración con lo anterior el presente proyecto tiene por objeto mostrar el cálculo de los parámetros de la distribución Weibull conocida por versatilidad y uso en la confiabilidad para los datos de TMEF de una banda transportadora mediante 2 métodos distintos a fin de mostrar distintos caminos para llegar calcular dichos parámetros, por otra parte se demuestra a través de una prueba de Kolmogórov-Smirnov que la distribución empleada para los datos de la banda transportadora es la apropiada, en resumen, los parámetros de la distribución permiten modelar la confiabilidad del equipo a través de unos intervalos de tiempo demostrando la importancia de las aplicaciones de estudios de confiabilidad en equipos que pudieran ser críticos en una organización.

2. Situación problemática

En los tiempos actuales las empresas necesitan aumentar el conocimiento de sus equipos por lo que es necesario incurrir en nuevas técnicas de control de las variables en especial para determinar el comportamiento de aquellos equipos que se consideran críticos, es donde se presenta la oportunidad de desmostar la importancia del estudio de los tiempos de falla mediante la determinación de los parámetros Weibull para la confiabilidad, en efecto, se puede indagar en aspectos importantes con los resultados y el estudio propuesto que muestren las condiciones del equipo en cuanto a su ciclo de vida, dicho comportamiento permitirá caracterizarlo e intuir los posibles cambios de mantenimiento que podemos encontrar del tiempo.

3. Justificación

La aplicación de técnicas de ingeniería en mantenimiento es una tendencia en incremento por parte de empresas que desean aumentar el control de sus activos, de este modo, el estudio de los tiempos de falla de la banda transportadora pretende demostrar la utilidad del control de variables aplicando el cálculo de los parámetros Weibull de confiabilidad mediante el método de momentos y grafico consiguiendo concluir el estado del equipo y como se encuentra en su operación, por otra parte, se pretende mostrar las gráficas de la distribución y completa interpretación de la confiabilidad a través del tiempo.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Calcular los parámetros de Weibull utilizando el método de momentos y el método gráfico usando el historial de fallas de una banda transportadora para determinar el comportamiento de la confiabilidad y la tasa de fallas.

4.1.1 Objetivos específicos

- Realizar una investigación del método de momentos para el cálculo de la distribución Weibull y el método gráfico.
- Establecer el perfil de falla de una banda transportadora usando la prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov
- Realizar una comparación de los resultados de ambos métodos de análisis

5. Marco referencial

5.1 Concepto de mantenimiento

Es el conjunto de actividades destinadas a mantener o restablecer la función de un activo siempre y cuando sea técnicamente y económicamente viable, es decir que las actividades deben poder realizarse sin mayores complicaciones en la ejecución con una relación costo beneficio pertinente para las compañías. La importancia del mantenimiento radica en la importancia de contar unas estrategias rápidas de recuperación y sostenimiento de los activos a fin de evitar parada en la productividad de la empresa, en resumen, una conservación del servicio con las técnicas más apropiadas según la naturaleza del activo. (Palencia, 2006)

5.1.1 Tipos de mantenimiento

5.1.1.1 Mantenimiento correctivo

Se entiende por mantenimiento correctivo como aquellas tareas que se llevan a cabo después de que una falla ocurre, en otras palabras, son acciones correctoras que generalmente llevan a paradas improductivas dentro de una planta, sin embargo, todo depende del equipo que a fallado debido a que en determinadas situaciones las fallas inesperadas resultan rentables sin mayores afectaciones en el proceso. Los mantenimientos de naturaleza correctiva afectan el indicador de confiabilidad debido a que no es proactivo en ningún aspecto. (Garrido, 2009)

5.1.1.2 Mantenimiento preventivo

Está diseñado para la prevención de los eventos de falla de los equipos empleando una serie de datos que determinan las frecuencias de los trabajos, es decir existen componentes dentro del equipo que deben remplazarse en tiempos determinados por la experiencia del personal según la cantidad de trabajo o por sugerencia del fabricante, en resumen, la finalidad es encontrar todos los problemas que generen fallas para anticiparse al evento inesperado además de que las prestaciones económicas con respecto a mantenimientos preventivos es mucho mayor. (Moscote, 2020)

5.1.1.3 Mantenimiento predictivo

Es conocido también como mantenimiento basado en la condición en donde se emplean una serie de técnicas de estudio de distintas variables para medir el deterioro progresivo de la condición del activo, está diseñado para establecer un diagnostico constante bajo un control de frecuencias con la finalidad de realizar operaciones de mantenimiento muy precisas aprovechando al máximo la vida útil de los componentes sin afectar las operaciones. (Moscote, 2020)

5.1.1.3.1 Inspecciones visuales

Consiste en la búsqueda de defectos en una macro medida empleando herramientas como micro cámaras, lentes de aumento, linternas etc., a fin de identificar grietas, salpicaduras, desgastes, abrasiones presentes en los materiales o equipos a analizar. En algunas ocasiones se emplean calibres cortados, los cuales son un set de calibradores empleados

para medir concavidades longitudes y ángulos en espacios muy pequeños a fin de garantizar el control de calidad, puede ser una tarea diaria por parte del departamento de mantenimiento como en operaciones. (Moscote, 2020)

5.1.1.3.2 Líquidos penetrantes

Empleado para analizar la superficie de un componente o equipo, la técnica consiste en aplicar una solución coloreada de forma uniforme sobre una superficie, este líquido tiene la cualidad de contar con baja densidad lo cual le permite ingresar en las imperfecciones superficiales con gran facilidad, en este punto se elimina el exceso de líquido y se añade un relevador, el cual actúa como secante evidenciando hasta la más mínima imperfección, de este modo se puede medir el nivel de deterioro para la mitigación de este. (Moscote, 2020)

5.1.1.3.3 Ensayo ultrasónico

Se emplea generalmente en materiales cuyo espesor es grande, consiste en impartir un campo magnético a un material ferromagnético, las imperfecciones superficiales o alteraciones internas en el espesor producirán distorsiones en el campo magnético evidenciando los defectos es posible que ya que mide el tiempo que transcurre entre la emisión de la señal y la recepción de su eco se puede determinar la distancia del defecto, ya que la velocidad de propagación del ultrasonido en el material es conocida. (Moscote, 2020)

5.1.1.3.4 Corrientes de Eddy

Se imparten corrientes eléctricas a través de un material conductor, el estímulo eléctrico magnetiza la superficie generando un campo cuyas variaciones en dichas corrientes son producidas por los imperfectos en el material evidenciándolos, en efecto, esta particularidad la hace útil para probar la calidad de materiales conductores. (Lopez & Pilco, 2011)

5.1.1.3.5 Estudios termográficos

Es un método de medición térmica a distancia en que a través de una cámara especial se evidencia la distribución de temperatura de las superficies, estas cámaras son capaces de medir la radiación infrarroja de la honda para dar una interpretación térmica como resultado, estas pruebas son de gran utilidad en los departamentos de mantenimiento debido a que siguen un control sin mayores complicaciones en su uso al mostrar sobrecalentamientos en componentes cercanos a la falla. (Strasse, 2012)

5.1.1.3.6 Análisis de lubricantes

Los aceites lubricantes son de gran importancia en la operación de gran cantidad de equipos ya que la película viscosa evita el desgaste mecánico por fricción entre las piezas en movimiento, en efecto la disminución o ausencia de este insumo lleva a potenciales afectaciones en la operación de la maquina como una disminución significativa de la vida

útil de los componentes, por otra parte, el estudio de este insumo dentro de una maquina puede revelar la condición interna del activo debido a la presencia de partículas metálicas dentro del aceite evidenciando anomalías como desgastes cuando un material se encuentra en abundancia dentro del aceite así como el desgaste que este tenga. (Gomez, Gonzales, & Rodriguez, 2003)

5.2 Indicadores de mantenimiento KPI

Los indicadores (key performance Indicators) están diseñados para medir el desempeño de un proceso referenciando con el objetivo deseado, es decir que son métricas sirviendo para cuantificar el rendimiento de una compañía, en efecto, están relacionados con la estrategia de las organizaciones. (Zagarra, 2016)

5.2.1 Características de los indicadores

Las principales características de los indicadores son 3 las cuales son pocos, claros y útiles, como primera medida no deben existir indicadores en abundancia debido a que el proceso se hace inviable al momento de cuantificar, por otra parte, deben ser lo suficientemente claros de tal forma que sean de sencilla comprensión al momento de incorporarlo al proceso, por último, deben representar una utilidad significativa para el proceso o estrategia que tiene la empresa para alcanzar los objetivos. Los Kpi cumplen la función de puente entre los ejecutivos de alto nivel con el grupo operativo dentro de las actividades de las empresas en donde la misión y visión juegan un papel muy importante. (ROSADO, 2018)

Cumpliendo las funciones de:

- Establecer valores aceptables que puedan indicar el cumplimiento de los objetivos
- Dar elementos necesarios para que se realice una completa evaluación de la actividad
- Identificar los factores del mantenimiento que sean sensibles en los procesos productivos
- Practicidad en la toma de decisiones
- Controlar la desviación de los valores requeridos con los reales (ROSADO, 2018)

5.2.2 Indicadores clase mundo

Aquellos empleados bajo los mismos términos en todo el mundo

5.2.2.1 Disponibilidad

Se define como la capacidad de un equipo para cumplir su función requerida en un momento específico entre un periodo de tiempo determinado, en otras palabras, es la probabilidad de un equipo se encuentre operativo para un tiempo específico, se define términos del tiempo medio entre fallas y el tiempo fuera de servicio según (Zambrano, Prieto, & Castillo, 2015):

$$D = \frac{TPEF}{TPEF + TPDR}$$

5.2.2.2 Mantenibilidad

Se conoce como la probabilidad de que un equipo en estado de falla pueda ser restablecido a su función dentro de un periodo de tiempo determinado en condiciones de mantenimiento específicas, es decir que este indicador mide el tiempo de reparación del equipo y la velocidad de mantenimiento, se halla mediante la expresión (Zambrano, Prieto, & Castillo, 2015):

$$TPDR = \frac{\text{Horas de mantenimiento correctivo}}{\text{cantidad de fallas}}$$

5.2.2.3 MTBF o TMEP (tiempo medio entre paradas)

Indicador muestra el tiempo promedio que transcurre una maquina en operación antes de alguna parada por daños mecánicos, evalúa la calidad de la gestión de mantenimiento porque es proporcional a un adecuado MTBF, se puede hallar dividiendo el numero de horas trabajadas sobre el número de paradas. (Zagarra, 2016)

$$MTBS = \frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{Número de paradas}}$$

5.2.2.4 MTTR (tiempo medio para reparar)

Muestra el tiempo promedio que demoran las reparaciones cada vez que se interviene el equipo, es decir tiempo destinado para actividades de restablecimiento de la condición (equipo inoperativo) indica información sobre el adecuado uso de la gestión de taller, se

puede calcular dividiendo las horas totales empleadas para reparar entre un número de paradas que la máquina. (Zagarra, 2016)

$$MTTR = \frac{\text{Horas en reparaciones}}{\text{Número de paradas}}$$

5.2.2.5 MTBF (tiempo medio entre fallas)

Es el tiempo promedio en el cual una máquina trabaja sin presentar fallas, se puede hallar dividiendo las horas trabajadas entre el número de fallas presentadas. (Zagarra, 2016)

$$MTBF = \frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{Nº de Fallas presentadas}}$$

5.3 Distribución Weibull de confiabilidad

Es una distribución que es empleada como única técnica para estimar una probabilidad de falla en base a una serie de datos asumidos o tomados de alguna maquinaria, en efecto, resulta muy útil por la capacidad de modelar un amplio rango de distribuciones, se encuentra caracterizado por estar compuesto por 3 parámetros como lo son:

- **Gamma:** es un parámetro de distribución referido a la posición empleado como punto de partida u origen de la distribución.
- **Eta:** es el parámetro de escala o también llamado parámetro de extensión.

- **Beta:** parámetro de forma, este refleja la dispersión de los datos determinando la forma que toma la distribución, también representa la variación de la tasa de fallos o también es interpretada como la pendiente de la recta.

Estos 3 parámetros pueden tomar determinados valores que son el punto de partida como una aproximación a otras distribuciones como la exponencial y el log normal. (Zalazar, Aguilar, Figueroa, & Perez, 2014)

La función de probabilidad y de distribución Weibull esta definida por

$$F_T(t) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right\} \quad (1)$$

Media

$$ET = \eta \Gamma \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right), \quad (2)$$

Mediana

$$T_{\text{MED}} = \eta \ln(2)^{1/\beta} \quad (3)$$

Moda

$$T_{\text{MOD}} = \eta \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{1/\beta} \quad (4)$$

Desviación estándar

$$\sigma_T = \eta \left(\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

Función de fiabilidad

$$R(t) = \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right\} \quad (7)$$

Razón de fallo

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (8)$$

5.3.1 Importancia de la distribución Weibull para el mantenimiento

Es una de las distribuciones más empleadas para tratar con datos históricos desde aspectos meteorológicos hasta análisis profundos del comportamiento de las fallas en ingeniería con tamaños de muestras muy reducidos, en efecto, la ingeniería de confiabilidad para caracterizar funciones de densidad de los conjuntos, es decir, que estas constantes pueden entender como un comportamiento asociado al desgaste, por otra parte, dentro del gráfico que emite esta distribución el eje x tomara valores asociados a tiempos, distancias, ciclos millas dentro de una escala logarítmica mientras que el eje y resta expresado como un porcentaje acumulado de la población de fallas. (Dillions, 2003)

6 Método de momentos

Es un método empleado en estadística el cual propone una serie de estimadores conocidos como momentos poblacionales respecto a un origen, visto de otro modo, si X es considerada una variable aleatoria, se precisa el K-esimo momento poblacional como:

$$\mu'_k = E\{X^k\} = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} x^k f(x) dx & ; \text{ si } x \text{ es continua} \\ \sum_{\forall i} x_i^k p(x_i) & ; \text{ si } x \text{ es discreta} \end{cases} \quad (9)$$

Se interpreta que la función f(x) es una función de densidad de la probabilidad de una variable aleatoria X, en otras palabras, este método consiste en la comparación de momentos poblacionales con sus respectivos momentos muestrales con el fin de plantear

una serie de ecuaciones correspondientes a la cantidad de parámetros desconocidos, finalmente los estimadores ya mencionados servirán para la solución de un sistema de ecuaciones.

6.1 Método de momentos empleando la distribución Weibull

Para facilitar los cálculos de momentos se realiza una relación con la distribución mas apropiada, como se maneja en gran cantidad de equipos se asume que la distribución Weibull en conjunto con el método de momentos se ajusta al calculo exacto de los parámetros, es decir, que se igualan los momentos justos de la distribución correspondientes con los momentos muestrales a fin de estimar parámetros desconocidos de la distribución, los momentos muestrales de una distribución están definidos por :

El momento muestral I-esimo alrededor de cero es

$$M'_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^r \quad (10)$$

Para definir el primer momento muestral alrededor de cero solo cambia el indicativo r por

1

Para el momento muestral I-esimo alrededor de la media

$$M_r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^r \quad (11)$$

Para el segundo momento muestral alrededor de la mediana o la varianza es:

$$M_2 = Var(X) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 \quad (12)$$

6.2 Aplicación del método de momentos para los TBF de la banda transportadora

Para realizar el método de los momentos primero se evidencian los datos de tiempo medio entre fallas

Tabla 1 Tiempo medio entre fallas de la banda transportadora

Datos Banda transportadora	
Numero de dato	Tiempo entre fallas
1	16,58
2	17,8
3	18
4	18,98
5	22,66
6	24,45
7	24,67
8	32,34
9	47,4
10	67,34
11	72
12	79,7
13	88,93
14	116,95
15	152,4
16	182,57
17	238,18
18	290,3
19	402,63
20	646,41
21	781,3

Fuente: elaboración del autor

El método propone que el valor gamma es el menor de los datos por tanto $Y = 16.58$ ahora para el calculo de Beta se tiene la siguiente ecuación

$$\frac{\sigma^2}{(U-Y)^2} = \text{GAMMA} \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left(\text{Gamma} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^2 / \left(\text{Gamma} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^2 \quad (13)$$

U= Media muestral

Y= Menor de los datos

σ = Desviación estándar

Gamma = función gama de la expresión

B= Beta

Como puede apreciarse no es posible despejar el valor de Beta por tanto se realiza un proceso de iteración empleando la igualdad, para ello se extrae un valor denominado de K de una parte de la igualdad como se muestra a continuación:

$$\frac{\sigma^2}{(U-Y)^2} = K \quad (14)$$

Tabla 2 Valores de las variables para hallar K

Media muestral (U)	72
Desviación estándar (σ)	212,1518366
Menor dato (Y)	16,58

Fuente: elaboración del autor

Remplazando los valores encontramos que $K = 14.6541472$

Tabla 3 Proceso de iteración

Beta (β)	K
0,49	26,159
0,51	20,3406
0,52	18,0867
0,53	16,16
0,54	14,5138

Fuente: elaboración del autor

Puede apreciarse se prueban distintos valores de Beta hasta encontrar el valor que tiene la mayor semejanza con el calculado de K, por tanto, se obtiene que Beta es igual 0.54, por consiguiente, se puede hallar el valor de eta por medio de la siguiente expresión:

$$Eta = \frac{(U-Y)}{\text{Gamma}(1+\frac{1}{\beta})} \quad (15)$$

Donde

U= Media muestral

Y= menor de los datos

ETA (n)	31,62924535
---------	-------------

En resumen, tenemos los 3 valores de los parámetros Weibull de la siguiente manera

Beta = 0.54

Eta = 31.62924535

Gamma = 16.58

7. Aplicación del método grafico para los TBF de la banda transportadora

El método grafico de momentos resulta más cómodo para el cálculo de los parámetros Weibull necesitando menos recursos y más habilidad en la ejecución del modelo, por este motivo se inicia con la tabla de los tiempos medio de fallas para la banda transportadora:

Tabla 4 Valores TBF para el método grafico

Datos Banda transportadora	
Numero de dato	Tiempo entre fallas
1	16,58
2	17,8
3	18
4	18,98
5	22,66
6	24,45
7	24,67
8	32,34
9	47,4
10	67,34
11	72
12	79,7
13	88,93
14	116,95
15	152,4
16	182,57
17	238,18
18	290,3
19	402,63
20	646,41
21	781,3

Fuente: elaboración del autor

Inicialmente se emplean los valores de frecuencia acumulada mediante la fórmula de

Bernard mostrada a continuación:

$$F(t) = \frac{(i-0.3)}{(n+0.4)} \quad (16)$$

I= numero del dato (no el valor de TBF)

N= número total de datos

Después con la F(t) se halla el valor del logaritmo natural para cada dato de TBF tomado como eje x y la expresión matemática $\text{Ln}(\text{Ln}(1/1-F(t)))$ como eje y, por otra parte es

necesario el cálculo de una línea tangente a punto de la resta de la siguiente manera, primero se toman un punto P1 (3.5,0) como punto de corte de la recta, de forma siguiente se tiene el punto P2 (6.4714359, 0.92931067) seleccionado como el punto ideal debido a su ubicación en el plano, Una vez seleccionado los puntos se desarrolla la ecuación de la recta tangente:

$$M = \frac{Y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{0.92931067}{6.4714339 - 3.5} = 0.31274822 \quad (17)$$

este valor corresponde al parámetro Beta

Empleado la ecuación de la recta tangente

$$Y - Y_2 = m \times (x - X_2) \quad (18)$$

se tiene la siguiente ecuación de la recta $Y = 0.31274822X - 1.0946187$

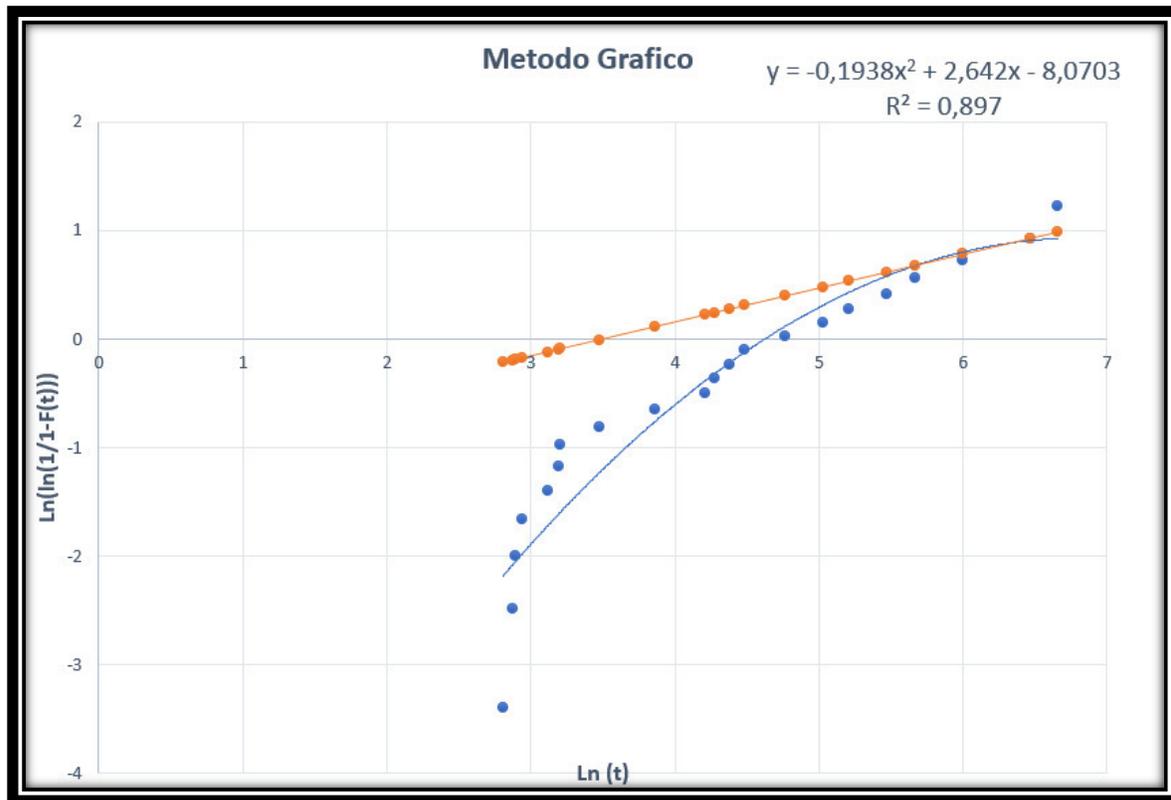
Finalmente encontramos la siguiente tabla de valores para poder graficar

Tabla 5 valores de los puntos para el método grafico

Datos Banda transportadora					
Numero de dato	Tiempo entre fallas (t)	F(t)	Ln(t)	Ln(ln(1/1-F(t)))	Y=0,31274822x-1,0946187
1	16,58	0,03271028	2,80819715	-3,40348334	-0,21636004
2	17,8	0,07943925	2,87919846	-2,49166198	-0,194154507
3	18	0,12616822	2,89037176	-2,003463219	-0,190660078
4	18,98	0,1728972	2,94338579	-1,661645928	-0,174080032
5	22,66	0,21962617	3,12060126	-1,394398299	-0,118656212
6	24,45	0,26635514	3,19663022	-1,172053652	-0,09487829
7	24,67	0,31308411	3,20558793	-0,97938116	-0,092076781
8	32,34	0,35981308	3,47630485	-0,807447338	-0,007410545
9	47,4	0,40654206	3,85862223	-0,650492124	0,112158534
10	67,34	0,45327103	4,20975441	-0,504508816	0,2219745
11	72	0,5	4,27666612	-0,366512921	0,242901016
12	79,7	0,54672897	4,37826959	-0,234122302	0,27467732
13	88,93	0,59345794	4,48784954	-0,105285078	0,308948256
14	116,95	0,64018692	4,76174649	0,021928399	0,39460904
15	152,4	0,68691589	5,02650864	0,149525769	0,477412931
16	182,57	0,73364486	5,20713366	0,279845003	0,533903084
17	238,18	0,78037383	5,47302669	0,415962097	0,617060655
18	290,3	0,8271028	5,67091487	0,562501963	0,678949832
19	402,63	0,87383178	5,99801803	0,727615827	0,781250761
20	646,41	0,92056075	6,47143398	0,929310672	0,929310757
21	781,3	0,96728972	6,6609592	1,22965981	0,988584433

Fuente: elaboración del autor

Gráfica: Curvas de TBF para la banda transportadora y línea tangente



Fuente: elaboración del autor

Como se conoce el valor de corte de la recta tangente (color naranja) del eje x en 3.5 como se muestra en la gráfica 1 el método indica que este valor será igual a la siguiente expresión:

$$3.5 = \ln(\eta) \quad (19)$$

$$e^{3.5} = \eta \quad (20)$$

$$\eta = 33.1154519 \quad (21)$$

Ahora que se conoce el valor de dos parámetros, por lo tanto, es posible determinar el tercero mediante la expresión $X = \ln(y + \eta)$ donde el valor de x es el punto de corte

de la curva característica de los datos (curva de color azul) es decir 4.6 por gamma (γ) será igual a:

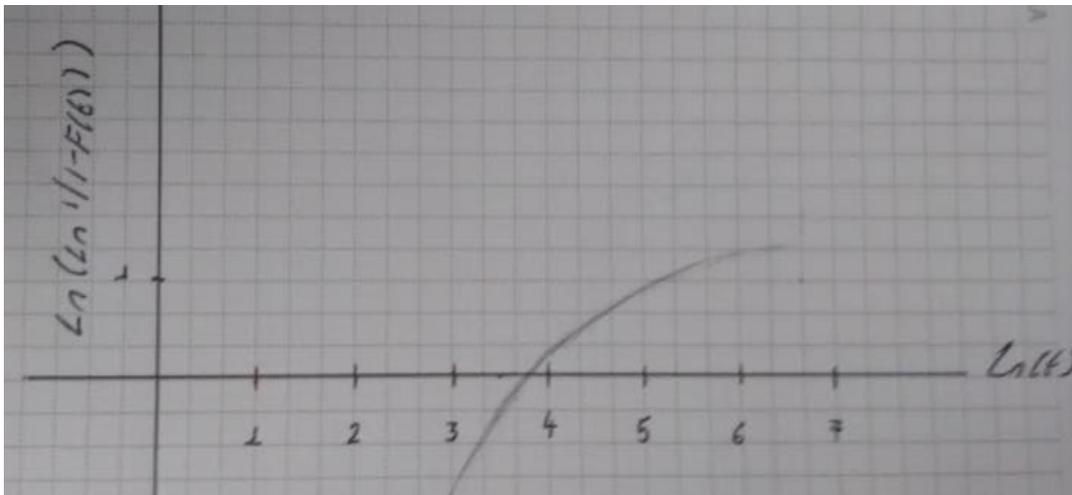
$$4.6 = \ln(y + \eta) \quad (22)$$

$$e^{4.6} - 33.1154519 = y \quad (23)$$

$$Y = 66.36886374 \quad (24)$$

Se aprecia que el valor Gamma resulta elevado en relación con el método de los momentos esto es debido a que el valor de R^2 hallado en la gráfica de Excel no alcanza a explicar el modelo con la efectividad requerida, por consiguiente, se emplea el método del papel Weibull el cual consiste en graficar manualmente la curva bajo una estimación de los puntos de corte exactos que explican el correcto comportamiento de la línea de tendencia, así como se muestra en la siguiente grafica

Grafica 2: Papel Weibull para la línea de tendencia TBF



Fuente: elaboración del autor

Como puede apreciarse en la gráfica 2 la curva del papel Weibull explica con más precisión la tendencia real además puede trabajar con la recta tangente teniendo en cuenta que el corte de esta sigue tomando el punto de corte en 3.5 del eje x y el papel Weibull tiene una proximidad con el punto P2(6.471143398, 0.929310672), en conclusión, la tendencia de la curva debe cortar en X=3.8 para que los valores de los parámetros Weibull sean los correctos. Partiendo de la nueva información tenemos solo cambios en el parámetro Gamma de la siguiente manera:

$$3.8 = \ln(y + \eta) \quad (25)$$

$$e^{3.8} - 33.1154519 = y \quad (26)$$

$$Y = 11.585732 \quad (27)$$

Valores de parámetros Weibull con el método gráfico son

$$\text{Beta} = 0.31274822$$

$$\text{Eta} = 33.1154519$$

$$\text{Gamma} = 11.585732$$

8. Curvas de confiabilidad

Con los parámetros de confiabilidad obtenidos podemos hallar las curvas de confiabilidad y no confiabilidad, para ello se emplean los datos del método de momentos, por consiguiente, se emplean las siguientes fórmulas:

$$R(t) = e^{\left(\frac{t-y}{\eta}\right)^\beta} \quad (29)$$

para la confiabilidad, en el caso de la no confiabilidad se emplea

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (30)$$

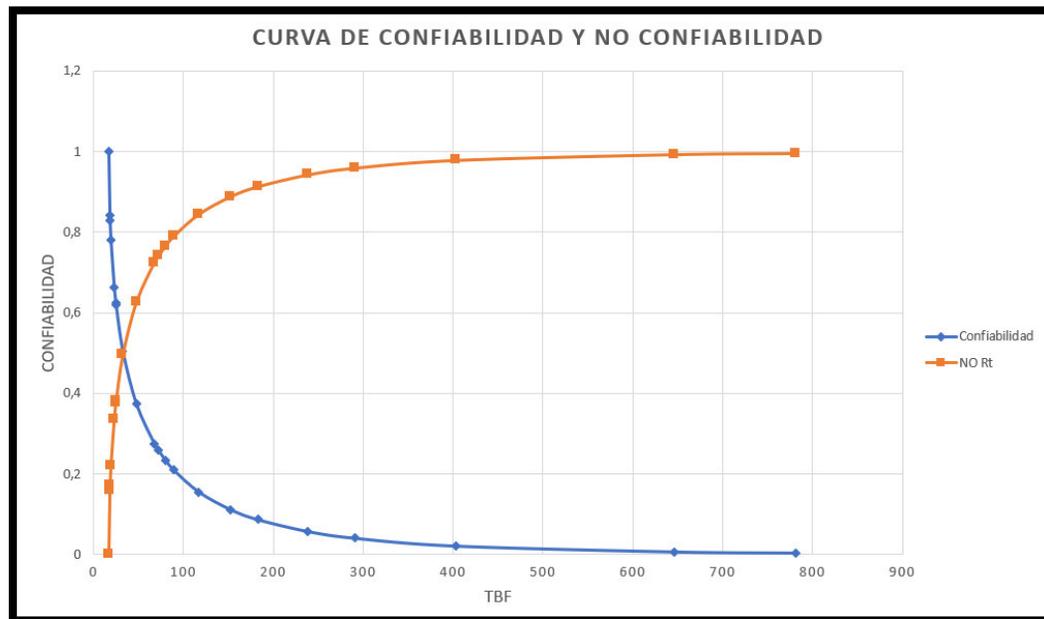
Una vez la expresión definida me muestran los valores en tabla número 6 correspondientes a la confiabilidad $R(t)$ y a la no confiabilidad $F(t)$

Tabla 6 Datos para la confiabilidad y no confiabilidad

Datos Banda transportadora			
Numero de dato	Tiempo entre fallas	R (t)	F (t)
1	16,58	1	0
2	17,8	0,841626061	0,158373939
3	18	0,829320088	0,170679912
4	18,98	0,77999678	0,22000322
5	22,66	0,663351879	0,336648121
6	24,45	0,623864436	0,376135564
7	24,67	0,619464861	0,380535139
8	32,34	0,503341173	0,496658827
9	47,4	0,373028106	0,626971894
10	67,34	0,274989576	0,725010424
11	72	0,2582752	0,7417248
12	79,7	0,234042479	0,765957521
13	88,93	0,209438877	0,790561123
14	116,95	0,154803574	0,845196426
15	152,4	0,111179724	0,888820276
16	182,57	0,086473741	0,913526259
17	238,18	0,057195763	0,942804237
18	290,3	0,040478293	0,959521707
19	402,63	0,021039511	0,978960489
20	646,41	0,00654149	0,99345851
21	781,3	0,003752777	0,996247223

Fuente: elaboración del autor

Grafica 3: Curvas de R(t) y F(t)



Fuente: elaboración del autor

Como puede apreciarse en el gráfico las el eje y esta interpretado por el valor de la confiabilidad siendo el eje x los rangos estimados de los tiempos de falla, por consiguiente, la curva naranja correspondiente a la no confiabilidad incrementa con el tiempo de manera contraria a la confiabilidad la cual disminuye conforme pasa el tiempo.

9. Prueba de bondad de Kolmogórov-Smirnov

Consiste en una prueba no paramétrica perteneciente a la estadística inferencial la cual pretende extraer información de las poblaciones, al tratarse de una prueba de bondad se pretende verificar si la distribución que se a escogido es la que mas se ajusta o la que mas describe el comportamiento de los datos a fin de demostrar si la hipótesis se cumple o no

se cumplé. Con el objetivo de comprobar si la distribución Weibull es la correcta para la naturaleza de los datos se realiza la prueba de bondad para determinar si es correcta la interpretación hasta el momento. (Pedrosa, Basterretxea, Robles, Basteiro, & Garica, 2015)

El método se basa en la forma de confiabilidad

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (31)$$

Donde se realiza una comparación con las funciones $F(i)$ y $F(t)$, de forma siguiente de be cumplirse la siguiente condición:

$$D_{n\alpha} > D_{n_{i_{max}}}$$

$D_{n\alpha}$ = la máxima discrepancia obtenida del proceso comparando la distribución propuesta con la distribución obtenida.

$D_{ni_{max}}$ = la máxima discrepancia que se puede aceptar para un determinado nivel de confianza.

Para el caso de estudio vamos a escoger un nivel de confían del 95% lo cual quiere decir que el valor de $\alpha = 0.05$ mediante la siguiente tabla:

Tabla 7 Datos de ajuste de Kolmogórov-Smirnov

Tabla 8								
Test de Kolmogorov-Smirnov sobre Bondad de Ajuste								
<i>n</i>	<i>Nivel de significación α</i>							
	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002	0.001
1	0.90000	0.95000	0.97500	0.99000	0.99500	0.99750	0.99900	0.99950
2	0.68337	0.77639	0.84189	0.90000	0.92929	0.95000	0.96838	0.97764
3	0.56481	0.63604	0.70760	0.78456	0.82900	0.86428	0.90000	0.92065
4	0.49265	0.56522	0.62394	0.68887	0.73424	0.77639	0.82217	0.85047
5	0.44698	0.50945	0.56328	0.62718	0.66853	0.70543	0.75000	0.78137
6	0.41037	0.46799	0.51926	0.57741	0.61661	0.65287	0.69571	0.72479
7	0.38148	0.43607	0.48342	0.53844	0.57581	0.60975	0.65071	0.67930
8	0.35831	0.40962	0.45427	0.50654	0.54179	0.57429	0.61368	0.64098
9	0.33910	0.38746	0.43001	0.47960	0.51332	0.54443	0.58210	0.60846
10	0.32260	0.36866	0.40925	0.45562	0.48893	0.51872	0.55500	0.58042
11	0.30829	0.35242	0.39122	0.43670	0.46770	0.49539	0.53135	0.55588
12	0.29577	0.33815	0.37543	0.41918	0.44905	0.47672	0.51047	0.53422
13	0.28470	0.32549	0.36143	0.40362	0.43247	0.45921	0.49189	0.51490
14	0.27481	0.31417	0.34890	0.38970	0.41762	0.44352	0.47520	0.49753
15	0.26589	0.30397	0.33750	0.37713	0.40420	0.42934	0.45611	0.48182
16	0.25778	0.29472	0.32733	0.36571	0.39201	0.41644	0.44637	0.46750
17	0.25039	0.28627	0.31796	0.35528	0.38086	0.40464	0.43380	0.45540
18	0.24360	0.27851	0.30936	0.34569	0.37062	0.39380	0.42224	0.44234
19	0.23735	0.27136	0.30143	0.33685	0.36117	0.38379	0.41156	0.43119
20	0.23156	0.26473	0.29408	0.32866	0.35241	0.37451	0.40165	0.42085
21	0.22517	0.25858	0.28724	0.32104	0.34426	0.36588	0.39243	0.41122

Fuente: Documento tablas estadísticas disponible online en:

<http://www4.ujaen.es/~mpfrias/TablasInferencia.pdf>

Como puede apreciarse en la tabla 7 para 21 datos el valor de $D_{na} = 0.28724$ además de calcular la función acumulada junto con la no confiabilidad, es decir:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (32)$$

$$F(i) = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (33)$$

Dni = máxima diferencia = F(t) -F(i)

Tabla 8 Función acumulada de Weibull

Numero de dato	Tiempo entre fallas (t)	X(i)	F(t)	Dni =1 Xi- F(t) l
1	16,58	0,03271028	0	0,03271028
2	17,8	0,079439252	0,158374557	0,078935305
3	18	0,126168224	0,170680573	0,044512348
4	18,98	0,172897196	0,220004045	0,047106849
5	22,66	0,219626168	0,336649281	0,117023112
6	24,45	0,26635514	0,376136818	0,109781677
7	24,67	0,313084112	0,380536402	0,06745229
8	32,34	0,359813084	0,496660298	0,136847214
9	47,4	0,406542056	0,62697346	0,220431404
10	67,34	0,453271028	0,725011936	0,271740908
11	72	0,5	0,741726288	0,241726288
12	79,7	0,546728972	0,765958968	0,219229996
13	88,93	0,593457944	0,790562517	0,197104573
14	116,95	0,640186916	0,845197655	0,20501074
15	152,4	0,686915888	0,888821316	0,201905428
16	182,57	0,73364486	0,91352716	0,1798823
17	238,18	0,780373832	0,942804934	0,162431102
18	290,3	0,827102804	0,95952226	0,132419456
19	402,63	0,873831776	0,978960835	0,105129059
20	646,41	0,920560748	0,99345865	0,072897902
21	781,3	0,96728972	0,996247312	0,028957592

Fuente: elaboración del autor

Por tanto, tenemos que $D_{ni\ max} = 0.27174$

Es decir que se cumple la condición

$$D_{n\alpha} > D_{ni\ max}$$

$$0.28724 > 0.271174$$

Se acepta que la distribución Weibull es la correcta para interpretar el comportamiento de los datos de la banda transportadora es aceptable en un 95%.

10. Comparación de los métodos

Para poder analizar los métodos se realizó una comparación de los valores de los tres parámetros obtenidos como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 9 Comparación de parámetros Weibull de ambos métodos

Valores de parametros Weibull			
	Beta	Gamma	Eta
Metodo de momentos	0,54	16,58	31,6292
Metodo grafico	0,312	11,58	33,1154

Fuente: elaboración del autor

Comentarios (basados en la comparación de los parámetros mostrados en la tabla 9)

La variación de los parámetros Weibull no resulta muy significativa encontrándose en la capacidad de modelar efectivamente los datos de la banda transportadora.

El método grafico resulto más complejo debido a que ajustar los puntos de corte que modelen correctamente el comportamiento requirió de uso de papel Weibull el cual es un aproximado.

El método grafico es significativamente mas complicado que el método de los momentos debido a que tiene pasos más precisos y largos.

Ambos métodos fueron efectivos en el calculo de los parámetros Weibull, sin embargo, el método de momentos netamente matemático se requerido del uso de iteraciones para el cálculo.

11. Conclusiones

Se realizó una completa indagación e investigación de ambos métodos para comprender como estos logran calcular los parámetros Weibull, cada uno de estos cuentan con características propias que los diferencian de una manera significativa, sin embargo, ambos resultan efectivos para hallar los parámetros.

El método gráfico resultó ser más complejo debido a que se contó con las limitaciones del programa Excel para modelar el comportamiento correcto de los TBF con valores de coeficiente de relación muy bajos como para poder explicar el modelo de manera completa, por esta razón, se empleó el papel Weibull para modelar un comportamiento estimado de la curva.

La prueba de bondad de Kolmogórov-Smirnov resultó positiva indicando que la distribución se ajusta a los datos, en efecto, debía comprobarse que la distribución cumpliera con el modelo para obtener resultados fiables y severos.

Las variaciones entre los resultados de los 3 parámetros Weibull no resultó significativa cuando se comparan ambos métodos, sin embargo, el método gráfico resulta más impreciso debido a los ajustes del papel Weibull en comparación con las iteraciones necesarias del método de momentos.

Las desviaciones de los parámetros de Weibull de entre los dos métodos son 0.228 para Beta, 5 para Gamma y 1.4862 para Eta, en efecto, muestra la diferencia no son significativas tomando en cuenta que ambos métodos son eficientes para hallar los tres parámetros, sin embargo, el método de los momentos resulta más preciso en comparación con el método gráfico, este puede mejorar el modelamiento si se emplean otros programas distintos a Excel para hallar las curvas con desviaciones estándar más precisas.

12. Bibliografía

- Dillions, B. (2003). *Desing Reability Fundamentals and Applications* . United States of America: CRC press.
- Garrido, S. G. (2009). *Mantenimiento correctivo-Organizacion y gestion en la reparacion de averias*. Madrid-España: Renovetec.
- Gomez, S. L., Gonzales, B. E., & Rodriguez, R. B. (2003). *IDENTIFICACIÓN DEL ANÁLISIS DE ACEITES LUBRICANTES COMO ELEMENTO DEL*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Lopez, D., & Pilco, M. A. (2011). *Se imparten corrientes eléctricas a través de un material conductor, el estímulo eléctrico magnetiza la superficie generando un campo, las variaciones en dichas corrientes son producidas por los imperfectos evidenciándolos, en efecto, esta particularidad*. Quito, Peru: Escuela Politecnica Nacional.
- Moscote, L. (2020). *Gestion en mantenimiento-Diplomado virtual*. Bucaramnga: Politecnico de suramerica.
- Palencia, O. G. (2006). *Mantenimiento general-Administracion de empresas*. Bogota Colombi,: Uptc.
- Pedrosa, I., Basterretxea, J., Robles, J., Basteiro, A., & Garica, J. (2015). *Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones*. Bogota: Pontificia Univesidadd Javeriana.
- ROSADO, R. H. (2018). *EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA DETERMINAR LA*. Arequipa-Peru: Universidad Nacional san Agustin de Arequipa.

Strasse, B. (2012). *Guia termografica de mantenimiento predictivo*. FLIR.

Zagarra, M. (2016). *Indicadores para la gestion de mantenimieno de equipos pesados*.

Universidad de alas Peruanas.

Zalazar, R., Aguilar, A., Figueroa, E., & Perez, F. (2014). *Aplicaciones de la idistribucion weibull en la ingenieria de la confiabilidad*. Univesiad UAN.

Zambrano, E., Prieto, A., & Castillo, R. (2015). Indicadores de la gestion de mantenimiento en las instituciones publicas de educacion superior del municipio Cabimas. *Telos. Revista de estudios interdisciplinarios en ciencias sociales* , 5.