

|| Jornadas Internacionales de Estadística Aplicada

5 y 6 de diciembre de 2019

Estudio de confiabilidad de rejilladoras Wirtz. Determinación del tiempo de mantenimiento preventivo óptimo

Bolívar, Mariel; Lopez, Josue Vladimir; Neiro, Nicolas; Pato, Juan Andrés

Universidad Nacional de Salta; Facultad de Ingeniería

Salta, Capital. japato36@gmail.com Tel: 3878-537968

RESUMEN

El objetivo principal de cualquier sector de mantenimiento de una empresa es hacer que el equipo cumpla la función para la cual fue adquirido al mínimo costo (**PAS 55**). Para lograr esto se debe prevenir el deterioro del desempeño de sus activos en servicio, y gestionar el riesgo de una falla cuando se pierde la función deseada del activo.

En base a esto se desarrolló un trabajo en donde se estudia el comportamiento de los molde de rejillas de 6 rejilladoras; de una empresa dedicada a la producción de baterías de vehículos; en lo que respecta a las fallas de las mismas a través de un periodo de 7 meses, para ello se han aplicado diseños estadísticos para conocer y analizar dicho comportamiento el cual permitirá determinar el Tiempo Óptimo de Mantenimiento (TOpM).

Se decidió por estudiar este equipo, más precisamente su molde de rejillas, debido a que esta produce las rejillas de plomo; las cuales constituyen los polos de las baterías utilizadas en los vehículos; por lo tanto las fallas en estos equipos significan grandes pérdidas para la empresa, que en ciertos casos pueden parar toda la producción.

En base a los datos proveídos por la empresa, se dio como resultado que los moldes de rejilla aún se encontraban en una etapa en la cual no era necesario el mantenimiento preventivo, pero sí mejoras para estabilizar correctamente su correcto funcionamiento

Palabras claves: Mantenimiento, falla, equipos, preventivo.

INTRODUCCIÓN

La **empresa** en cuestión, se encarga de la fabricación y ventas de baterías, placas e insumos para diferentes tipos de vehículos.

La misma está equipada con tecnología de última generación entre ellas un Espectrofotómetro de Absorción Atómica y una planta de tratamiento de efluentes dotada de un equipo de control de avanzada. Está certificada con la norma **ISO 9001:2008 (se basa en el cumplimiento de un sistema de gestión de calidad centrado en los elementos de administración y optimización con los que cuenta la empresa)**, siendo su próxima meta

la certificación **ISO 14001** (*que indica cómo poner un sistema de gestión medioambiental efectivo en el sitio*), reafirmando su compromiso con el medioambiente. La expansión del negocio le permite proveer al mercado nacional de una extensa gama de productos y servicios, entre ellos: baterías, placas, plomo, agua destilada, ácido sulfúrico, separadores, plásticos, monoblocks, entre otros.

METODOLOGÍA

El experimento en sí consiste en determinar el Tiempo Óptimo de Mantenimiento preventivo (TOpM) que debe realizarse a los molde rejilla de las 6 rejilladoras de la empresa en cuestión con el fin de evitar paradas que comprometan significativamente la producción y tratar de demostrar si los métodos estadísticos utilizados proveen alguna información o dato a esperar, y de no ser así especificar las fallas.

Los datos de los que se partieron provienen de una planilla de trabajo, en la que se halla información detallada sobre los trabajos de mantenimiento realizados en distintas líneas de producción y en distintos equipos de las mismas, tales como: fecha de inicio y fin de la reparación, tiempo de reparación (Tiempo de parada Tp), Maquinaria (Tipo, Código, Línea de pertenencia, etc.), tarea solicitada (Prueba de registro, verificación de funcionamiento, etc.), entre otros.

En base a esto se van a obtener las variables aleatorias que se necesitan para desempeñar la tarea, las cuales en este caso son:

- ❖ **Tiempo hasta la falla (TTF):** Lo podemos definir como el tiempo entre dos fallas consecutivas
- ❖ **Tiempo de parada (TP):** Es el tiempo en el que un equipo que ha fallado permanece parado hasta que se repara.

Se analiza si los molde rejilla tienen tiempos hasta la falla y de detención iguales o no.

En base a dicho estudio, se analizarán uno o varios moldes y se procede a deducir su distribución de probabilidad y los parámetros de la misma.

En la ingeniería de confiabilidad es muy usada la distribución Weibull. Una característica fundamental de las variables que siguen dicha distribución es que “el número de ocurrencia de eventos por unidad de tiempo no permanece necesariamente constante; es decir, esta tasa de ocurrencia de eventos puede crecer o decrecer con el tiempo”.

La Distribución Weibull es esencialmente una familia de distribuciones que puede asumir las propiedades de otras distribuciones. Por ejemplo, dependiendo de los valores que toma su parámetro de forma (simbolizado β), puede ser usada como una aproximación a la Exponencial (cuando $\beta = 1$) y a la Normal (cuando $\beta = 4$), así como otras.

Y para el caso de estudiar los tiempos de mantenimiento, el valor de su parámetro debe ser mayor a uno ($\beta > 1$), ya que la distribución en ese caso se encuentra en la zona de

desgaste por envejecimiento, la cual requiere de mantenimiento con el fin de tratar de extender la vida útil del equipo lo máximo posible.

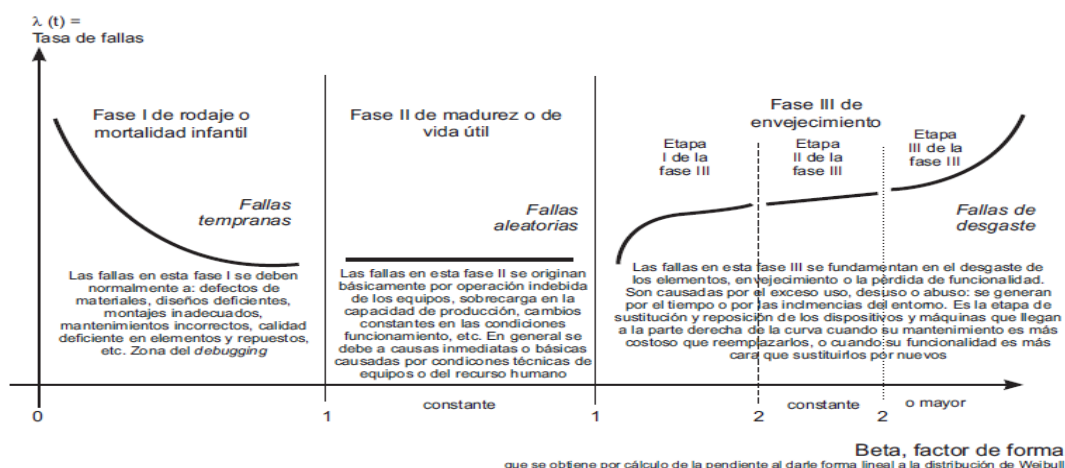


Figura 4. Gráfica de la curva de bañera o de Davies. Observe cómo se distribuye la tasa de falla instantánea en las distintas etapas. Extraído del libro: *Mantenimiento: Planeación, ejecución y control* - Alberto Mora Gutiérrez

El parámetro Beta refleja la dispersión de los datos y determina la forma que toma la distribución Weibull. En la fase I de la curva de Davies (cuando $\beta < 1$) las fallas se deben a problemas de montaje, diseño, ingeniería, condicionamiento, etc. y generalmente se dan antes de que el equipo comience a producir. En la fase II (cuando $\beta = 1$) ya se empieza a tener cierto control sobre las fallas imprevistas y empiezan a estabilizarse en tiempo de duración, esta etapa corresponde al periodo de vida útil del equipo. Normalmente, en la fase II las fallas intempestivas y desconocidas desaparecen. En la etapa I de la fase III ya las fallas se vuelven muy similares en tiempo y se conocen con antelación. En la zona II de la fase III la duración de las fallas tiende a estabilizarse. Y en la sección III de la fase III ocurren fallas totalmente predecibles y sus tiempos de duración se normalizan totalmente.

En base a esto, si la distribución del tiempo entre fallas está en la fase III ($\beta < 1$) podremos hallar el Tiempo Óptimo de Mantenimiento (T_{OpM}), lo cual es el objetivo principal del experimento. En caso de no ser así, significa que el equipo aún está en la fase I o II.

Para determinar el tiempo óptimo para la ejecución de un mantenimiento preventivo, necesitamos formular el siguiente modelo matemático que describe la relación entre los costos y los riesgos. El tiempo de mantenimiento óptimo se halla minimizando el costo por unidad de tiempo C_{PUT} (t).

$$C_{PUT}(t) = \frac{\text{Costo Total Esperado de Reeemplazo por ciclo}}{\text{Longitud del ciclo esperado}}$$

$$C_{PUT}(t) = \frac{C_P \cdot R(t) + C_U \cdot [1 - R(t)]}{\int_0^t R(s) ds}$$

Donde:

R(t): Confiabilidad al tiempo t

Cp: Costo de reemplazo planificado

Cu: Costo de reemplazo no planificado

El numerador indica que puede ocurrir uno u otro evento, es decir puede ocurrir un mantenimiento preventivo (probabilidad expresada por el 1º miembro del numerador) o un mantenimiento correctivo (expresada por el 2º miembro). Cada miembro me proporciona un costo; ya sea por mantenimiento preventivo o por correctivo. El denominador depende del tipo de distribución de probabilidad que siguen los datos.

El tiempo t de reemplazo óptimo se obtiene minimizando CPTU (t):

$$\frac{\partial [CPUT(t)]}{\partial t} = 0$$

Resolviendo para t, que satisfaga la expresión anterior, nos permite obtener un t óptimo de MP. Evidentemente, si el costo de una falla no es mayor que el costo de una reparación programada, no interesa económicamente determinar un cambio preventivo, sino dejar que el activo funcione hasta la falla (Run To Failure). Se observa además que el CPUT (t) exige conocer la distribución de fallas, entonces para cada caso particular habrá que hallar en mínimo CPUT (t), empleando métodos numéricos aproximados.

Luego se procede a estimar los valores esperados (Tiempo medio hasta la falla y duración media de la detención) de las variables aleatorias analizadas, el cual depende del tipo de distribución que siguen los datos, en este caso es Weibull. Los valores esperados de las variables aleatorias me van a permitir también hallar la disponibilidad de los equipos, la misma se define como la habilidad de un ítem para estar en un estado capaz de realizar una función requerida bajo condiciones determinadas en un instante o intervalo de tiempo dado asumiendo que todos los requerimientos externos son proporcionados (IEC 60050-191:1990). Su ecuación se muestra a continuación:

$$\text{Disponibilidad} = \text{TMF} / (\text{TMF} + \text{TMP})$$

La metodología a seguir durante el desarrollo del experimento se detalla a continuación:

- 1) **Comparación de los equipos de distintas líneas de producción (Comparación de tratamientos):** Se comparan los tiempos hasta la falla y de parada de las distintas máquinas para ver si son iguales. Para validar estas comparaciones se deben cumplir las siguientes suposiciones:

- ❖ Error experimental con distribución Normal con media igual a 0 y varianza constante
- ❖ La sumatoria de los efectos de los tratamientos debe ser igual a 0

En caso de no cumplirse dichas suposiciones se deben aplicar métodos no paramétricos para verificar la igualdad de los datos obtenidos de las máquinas

2) **Análisis weibull-Prueba de bondad de ajuste:** Se identifica la distribución de probabilidad de los datos de la o las máquinas elegidas.

3.1) **Histograma Box-Plot:** Un gráfico ilustrativo que nos permitirá ver la dispersión de los datos con mucha claridad, además nos permitirá ver los valores atípicos que pueden o están generando problemas en el experimento.

3) **Estimación puntual de TTF y TP:** Se realiza la estimación puntual de los tiempos hasta la falla y los tiempos de parada de los moldes de las rejilladoras a analizar. Como es un estimador puntual, esta estimación no es muy informativa, por lo que se procederá a realizar lo que se describe a continuación.

4) **Intervalos de confianza para los TMF y TMP:** Se calculan los intervalos de confianza para cada estimación puntual del promedio de los tiempos analizados.

5) **Determinación del MPOp:** Mediante software se hallaran estos valores a partir de los datos calculados anteriormente. En base a los resultados se llegarán a las conclusiones finales de este experimento. También en esta sección se calculará e interpretará la disponibilidad.

DESARROLLO

1) Comparación entre los molde de rejilla según su tiempo hasta la falla (TTF).

Supuestos del error experimental:

- Error aleatorio con distribución normal.
- Media igual a cero.
- Varianza constante.

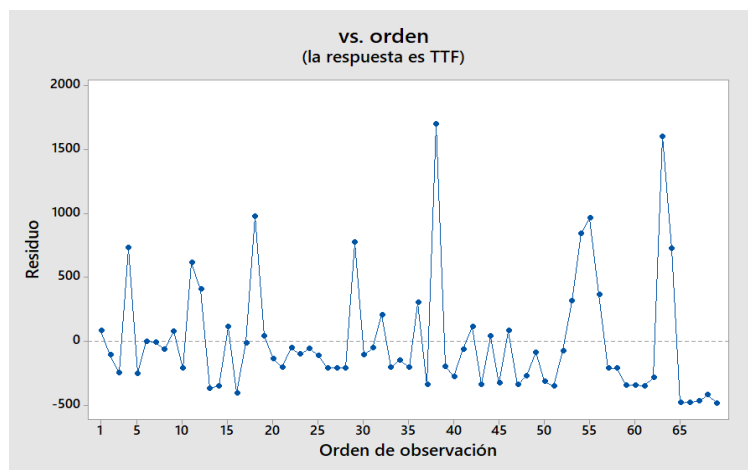


Figura 5. Gráfica Residuos vs. Orden

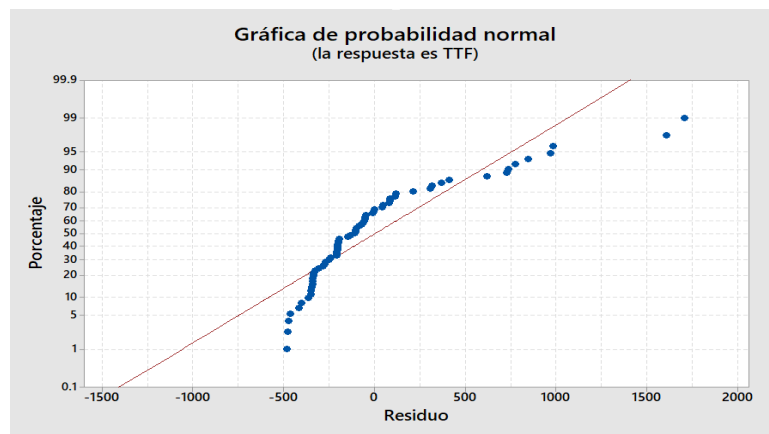


Figura 6. Gráfica de probabilidad Normal de los residuos.

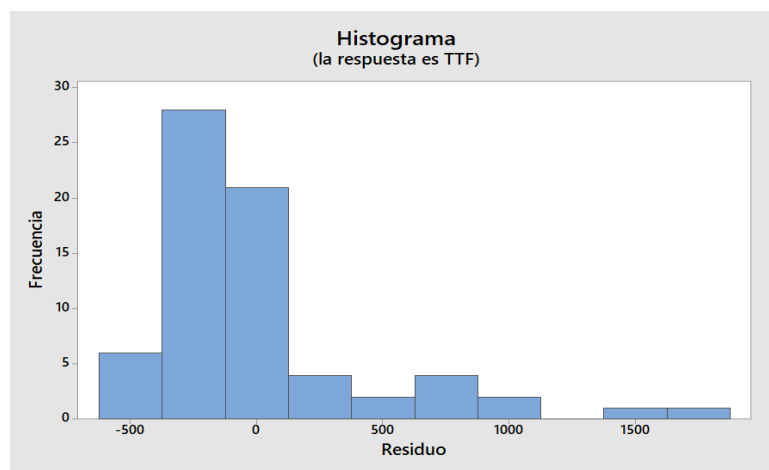


Figura 7. Histograma de frecuencias del TTF

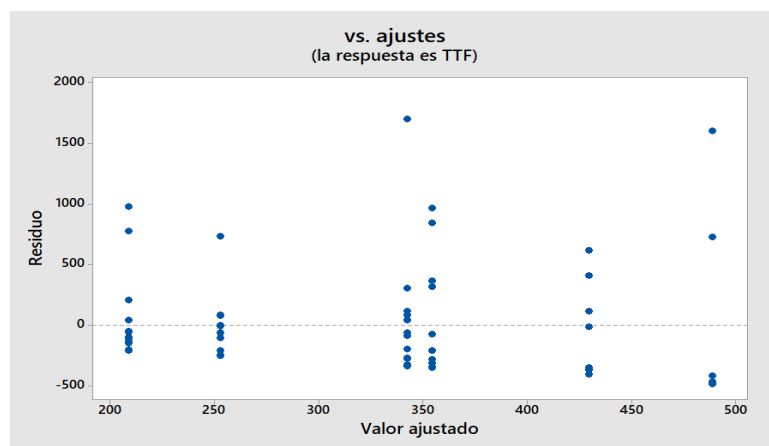


Figura 8. Gráfica de Residuos vs. valor ajustado

Como los supuestos del error no se cumplen, para poder realizar la comparación entre los molde de rejilla según su tiempo hasta la falla se usarán los métodos no paramétricos.

Métodos no paramétricos.

Prueba de Kruskal-Wallis

H₀: Las medianas de los tiempos hasta la falla de los molde de rejilla son iguales.

H_a: Las medianas de los tiempos hasta la falla de los molde de rejilla son distintas.

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Prueba

Hipótesis nula H₀: Todas las medianas son iguales
Hipótesis alterna H₁: Al menos una mediana es diferente

Método	GL	Valor H	Valor p
No ajustado para empates	5	2.86	0.721
Ajustado para empates	5	2.86	0.721

Rechazar H₀ si el valor-p $\leq \alpha$.

Como $0.721 \geq 0.05$ No rechazo H₀ es decir los tiempos hasta la falla entre molde de rejilla son iguales.

Comparación entre los molde de rejillas según su duración de parada (TD).

Los supuestos del error experimental para esta variable son los mismos que para el tiempo hasta la falla; distribución normal con media cero y varianza constante.

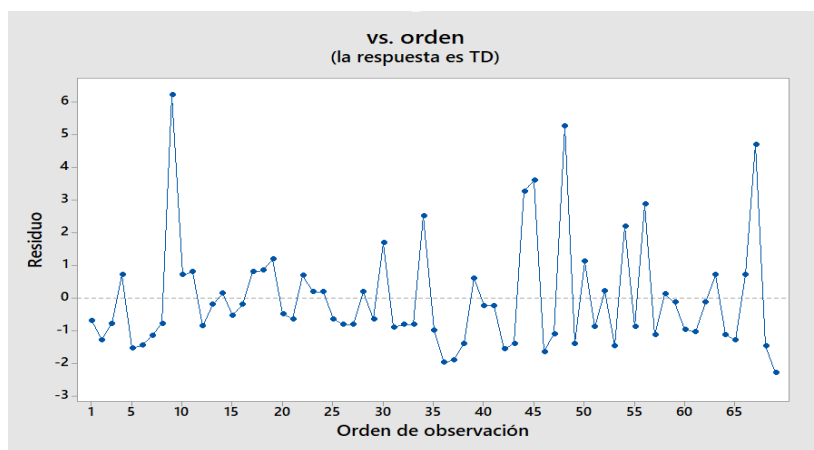


Figura 9. Gráfica Residuos vs. Orden

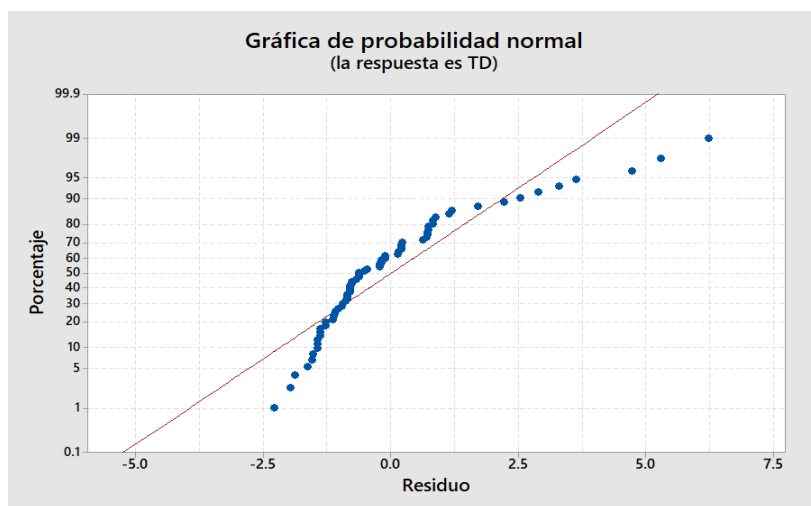


Figura 10. Gráfica de probabilidad Normal de los residuos.

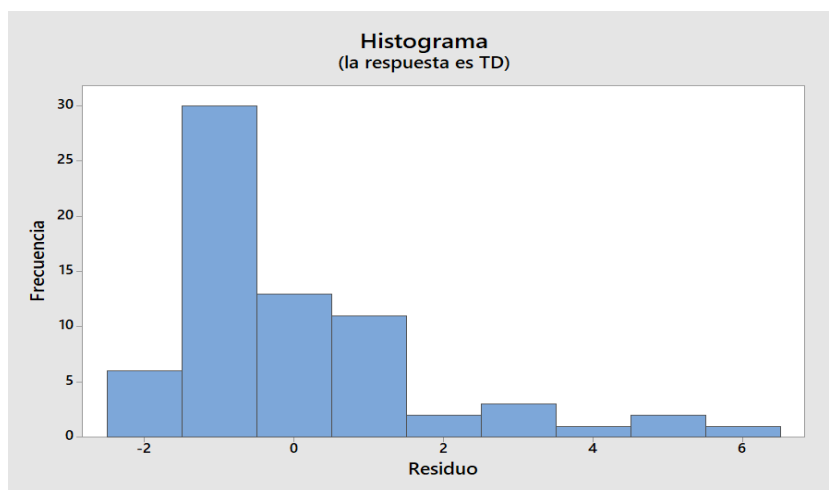


Figura 11. Histograma de frecuencias del TD

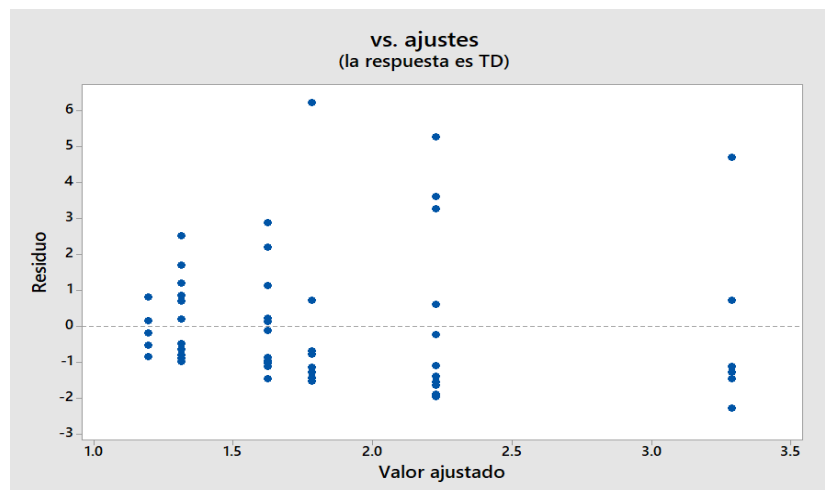


Figura 12. Gráfica de Residuos vs. valor ajustado

Como aquí tampoco se cumplen los supuestos recurriremos nuevamente a los métodos no paramétricos.

Métodos no paramétricos.

Prueba de Kruskal-Wallis

H₀: Las medianas de las duraciones de paradas de los moldes de rejillas son iguales.

H_a: Las medianas de las duraciones de paradas de los moldes de rejillas son distintas.

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Prueba			
Hipótesis nula	H ₀ : Todas las medianas son iguales		
Hipótesis alterna	H ₁ : Al menos una mediana es diferente		
Método	GL	Valor H	Valor p
No ajustado para empates	5	7.19	0.207
Ajustado para empates	5	7.20	0.206

Rechazar H₀ si el valor-p $\leq \alpha$.

Como $0.721 \geq 0.05$ No rechazo H₀ es decir las medianas de las duraciones de paradas de los moldes de rejillas son iguales.

2) Análisis weibull-Prueba de bondad de ajuste:

Debido a que en el análisis anterior concluimos que ambas variables aleatorias (TTF y TD) de los moldes rejilla de las rejilladoras estudiadas provienen de una misma población, podemos juntar todas las fallas de todos los equipos y obtenemos una base de datos amplia, ya las conclusiones que obtengamos a partir de ahora son válidas para cualquier molde rejilla de cada rejilladora, es decir que podemos tratar todos estas variables como si fueran "de un solo equipo". Mediante el software Minitab 15, demostraremos la distribución de probabilidad que siguen el Tiempo hasta la falla y la duración de parada.

Los resultados de la prueba de bondad de ajuste se muestran a continuación:

Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P
Normal	7,987	<0,005
Exponencial	14,105	<0,003
Weibull	0,674	0,078
Gamma	0,638	0,117

Estimaciones ML de los parámetros de distribución

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor
				umbral
Normal*	74,29015		127,29416	
Exponencial			74,29015	
Weibull		0,55322	45,17349	
Gamma		0,42221	175,95572	

* Escala: Estimación de ML ajustado

Podemos ver que las distribuciones a las que más se ajusta son :Weibull y Gamma (es la mayor de todas). Nosotros vamos a utilizar la Weibull debido a los motivos expuestos anteriormente.

Los parámetros obtenidos para esta distribución seleccionada aparecen en la tabla siguiente:

$$\beta = 0,55322$$

$$\delta = 45,17349$$

Para el caso de los tiempos de parada "TD" obtuvimos:

Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P
Normal	4,134	<0,005
Exponencial	1,025	0,109
Weibull	0,836	0,029
Gamma	0,832	0,040

Estimaciones ML de los parámetros de distribución

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor
				umbral
Normal*	1,94552			1,85057
Exponencial				1,94552
Weibull		1,14951	2,05392	
Gamma		1,36954	1,42057	

* Escala: Estimación de ML ajustado

Aquí vemos que a la distribución a la que más se ajusta es la exponencial, seguida de la Gamma, seguida a esta, la Weibull.

2.1) Histograma y Box-Plot

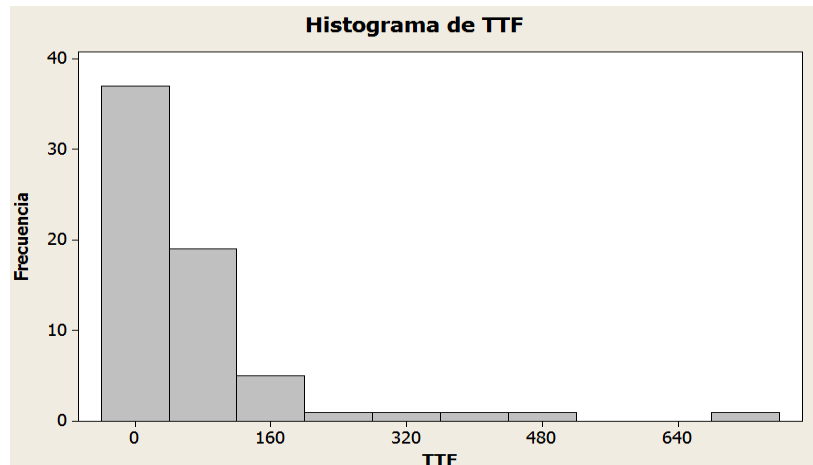


Figura 13. Histograma del Tiempo hasta la falla.

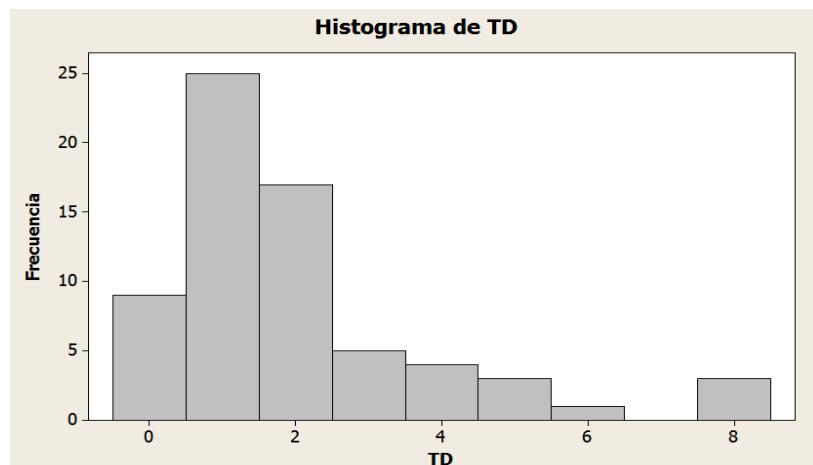


Figura 14. Histograma de la duración de la parada.

En ambos histogramas se aprecia una asimetría o “cola” hacia la derecha.

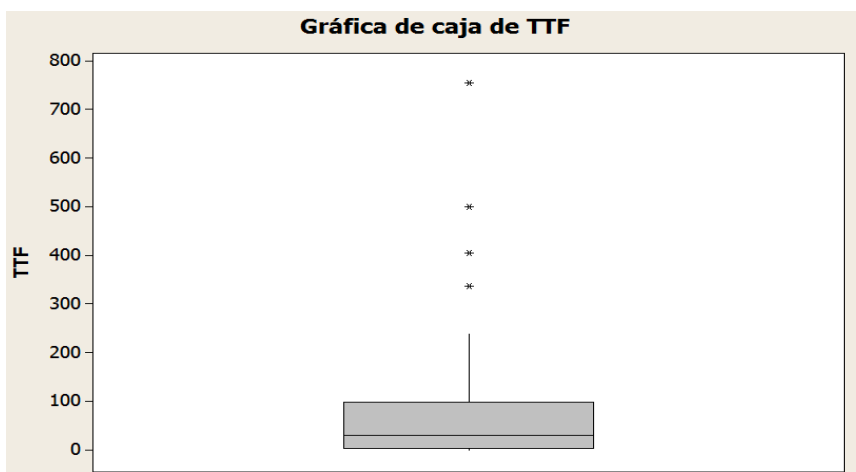


Figura 15. Diagrama de caja y sesgo del TTF, nótese lo dispersos que están los datos arriba.

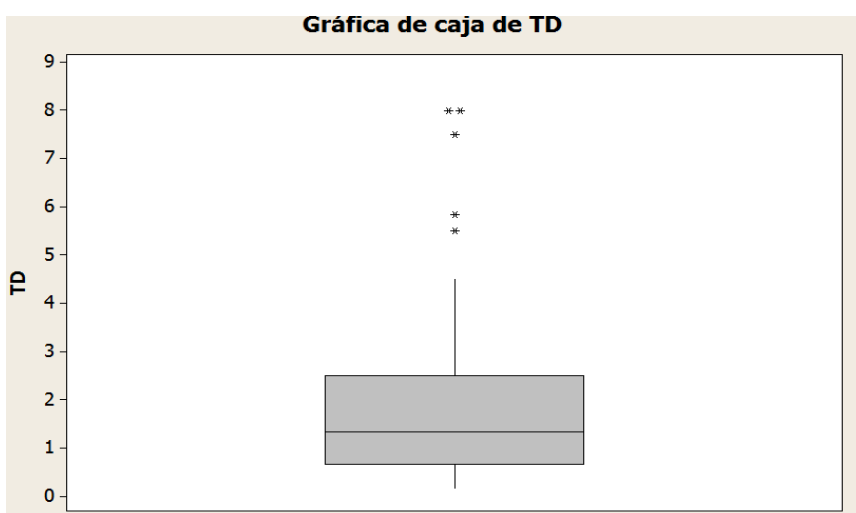


Figura 16. Diagrama de caja y sesgo para el TD.

En ambos casos se observan datos atípicos, los cuales probablemente me estén generando problemas en el análisis, no podremos quitarlos debido a que no se dispone de información acerca de que sí las maquinas estuvieron en funcionamiento continuo o no.

3) Estimación puntual del TTF y TD:

Mediante el programa Excel estimamos puntualmente el Tiempo medio hasta la falla y la duración media de la parada. El valor esperado de una distribución Weibull se calcula con la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \delta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Los resultados se muestran a continuación.

TMF=76,21916931 horas

TMP=1,954961559 horas

4) Análisis con intervalo de confianza

Intervalo de confianza para TMF:

Intervalo de tolerancia: TTF

Método

Distribución	Weibull
Nivel de confianza	95%
Porcentaje de población en el intervalo	95%

Estadísticas

Variable	N	Media	Desv.Est.
TTF	69	320.179	465.353

Parámetros de distribución

Variable	Forma	Escala
TTF	0.523	193.580

Intervalo de tolerancia de 95%

Variable	Método de Weibull	Método no paramétrico	Confianza lograda
TTF	(0.025, 4773.573)	(0.000, 2093.500)	86.55%

El nivel de confianza alcanzado se aplica sólo al método no paramétrico.

Se observa que el intervalo de confianza es muy amplio, los tiempos de fallas pueden estar desde las 0hs hasta las 2093,5 hs del modo no paramétrico, la precisión observada no es la mejor obtenida.

Intervalo de confianza para TMP:

Intervalo de tolerancia: TD

Método

Distribución	Weibull
Nivel de confianza	95%
Porcentaje de población en el intervalo	95%

Estadísticas

Variable	N	Media	Desv.Est.
TD	69	1.811	1.802

Parámetros de distribución

Variable	Forma	Escala
TD	1.137	1.907

Intervalo de tolerancia de 95%

Variable	Método de Weibull	Método no paramétrico	Confianza lograda
TD	(0.034, 8.102)	(0.167, 8.000)	86.55%

El nivel de confianza alcanzado se aplica sólo al método no paramétrico.

El tiempo de parada puede oscilar desde 0,167hs y 8hs, menos amplio que el intervalo de confianza hasta la falla, con una confianza lograda de el 86,6% aproximadamente.

$$\text{Disponibilidad} = \text{TMF} / (\text{TMF} + \text{TMP}) = 0.9749922$$

4) Determinación del MPOp:

Conjeturas y determinación de MPOp:

Observando el valor de β , vemos que esta máquina aún se encuentra en la etapa infantil de la curva de bañera.

Se observó una pérdida de desempeño se recomienda a la empresa que se tenga un control más continuo y certera para tener un número significativo de unidades para que el análisis pueda aportar más al manejo del mantenimientos en los equipos.

CONCLUSIONES

Los problemas que se terminó encontrando no solo fueron de la maquinaria sino también de la parte administrativa, teniendo observaciones con casillas en blanco y datos que a veces no son coincidentes con el siguiente, siendo esto un efecto negativo a la hora de hacer los análisis, a la problemática de producción se le hace extenso el poder realizar la tarea de una examinación más profunda, sabiendo con los problemas que se podrían encontrar recomendamos y creemos que para cada máquina o trabajo de producción se concluye que los datos estimados se encuentran en una etapa infantil dentro de la curva de bañera, así que pueden ser fallas de ensamblaje, falla de diseño, falla ingenieril.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Mantenimiento: Planeación, ejecución y control-Alberto Mora Gutierrez-AlfaOmega.

[2] INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD Y ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE RIESGO-Medardo Yañez Medina; Hernando Gómez de la Vega; Genebelín Valbuena Chourio-Reliability and Risk Management, S. A.

[3] Ingeniería de confiabilidad-MÓDULO 2-3º parte-UCaSal.

[4] Apuntes varios de la asignatura de Estadística Experimental de la Ing. Karla Gisella Mautino.

SOFTWARE UTILIZADOS

[1] Minitab 15.

[2] Microsoft Excel, versión 2013.

DIRECCIONES WEB UTILIZADAS

[1]<http://baterias-edna.com.ar/empresa/>

[2]<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/key-results/>