

## **II Jornadas Internacionales de Estadística Aplicada 5 y 6 de diciembre de 2019**

### **ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y COSTOS DE CAMIONES MINEROS**

Autores: Alberto, Ariel Ezequiel. Guerra, Lucas Javier. Soposa, Gastón Nicolás.

Institución: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta. Salta Capital. Argentina.

Datos de contacto: [albertoariel40@gmail.com](mailto:albertoariel40@gmail.com) tel: 3876199412

#### **RESUMEN**

Con el objetivo de estudiar la posibilidad de disminuir la presencia de fallas y planificar una adecuada actividad de mantenimiento hacia una flota de camiones mineros se desarrolló un análisis donde se utilizaron distintas herramientas Estadísticas. La finalidad es evaluar sus comportamientos para medir sus riesgos y ayudar a mejorar los costos en reparaciones y la disponibilidad en general del transporte considerado como base fundamental en la actividad minera. Para ello se hará un análisis cualitativo del cual se podrán tomar conclusiones específicas con solo analizar los gráficos (caja y bigote) y luego un análisis cuantitativo el cual dará más peso a nuestras conclusiones ya que se llevarán a cabo comparaciones entre tratamientos y análisis de mantenibilidad y confiabilidad.

**Palabras Claves:** Disponibilidad, Falla, Mantenimiento, Costos.

#### **INTRODUCCIÓN**

El uso principal de estos camiones, como se observa en la Imagen (1), es el de trasladar los materiales tronados (deteriorados por efecto de uso) desde la mina para su evacuación de la misma.



*Imagen (1): Camiones mineros.*

El camión puede prestar servicio tanto en la mina rajo abierto como en las canchas (Stock). Su correcta operación contribuye a aumentar la productividad y a reducir los costos de operación.

Para tener un primer acercamiento a la importancia de estos equipos es necesario saber que “un camión grande en minería” cuesta actualmente en torno a US\$4 millones, demora al menos dos

años en estar operativo en mina después de haber puesto su orden de compra y tiene una vida útil en torno a 15 años. Sabiendo de los datos proporcionados que un camión modelo 830E posee un costo de duración de detención por fallas de U\$S 50737 en una parada de 10 horas aproximadamente (depende del tipo de falla).

Por este motivo es importante el estudio de operación de los mismos de manera de entregar información adecuada, que permitan a la empresa disminuir los costos, ya sea al optimizar sus recursos en las labores de mantenimiento, como al presentar opciones alternativas para la toma de datos y sus posteriores análisis.

Como se ha mencionado anteriormente, se han utilizado herramientas estadísticas de forma de conseguir modelos predictivos de las variables a considerar, en este caso analizamos las fallas imprevistas y sus respectivos costos por hora de parada. Para realizar la inferencia estadística se han hecho una serie de supuestos, para encontrar la correlación de las variables de forma de conseguir la mayor información posible con el mínimo de datos y el comportamiento general que tiene una flota de 22 camiones de 5 tipos, para luego estudiar a través de la confiabilidad sus mantenibilidades.

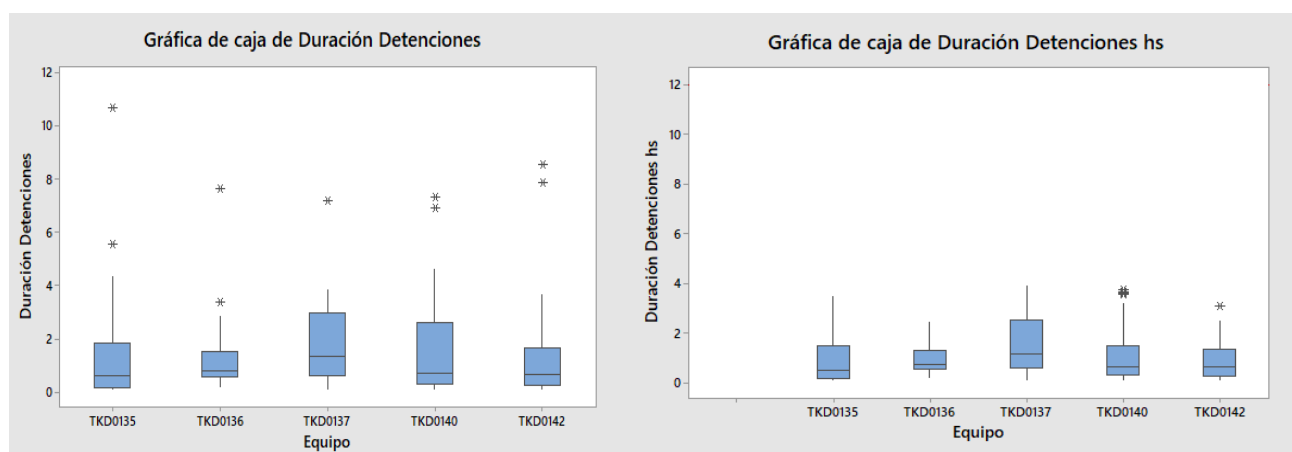
Luego se imparten las conclusiones necesarias y apropiadas en las que se incluyen propuestas de mejora, para que un tomador de decisiones pueda hacerlo con conocimientos más profundos de funcionamiento.

## METODOLOGÍA

El software empleado en el desarrollo es Minitab.

## ANÁLISIS CUALITATIVO DE LOS DATOS:

Comenzamos el experimento haciendo una prueba o diagrama de caja y bigote o mejor conocido como box plot para ver la existencia de datos atípicos que puedan degenerar o alterar los estadísticos o bien el análisis que realizaremos como se observa en la Gráfica (1).



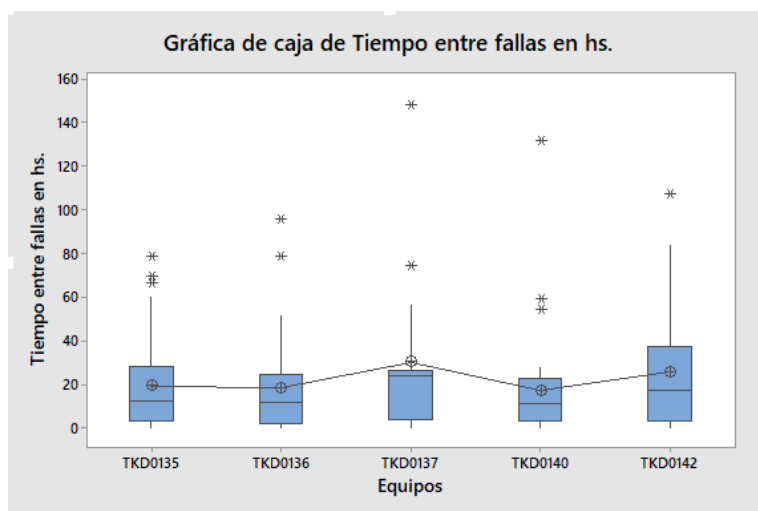
Gráfica (1): Diagramas de Caja y Bigote para la duración de detenciones:

Para no tener inconvenientes, ya que no tenemos las causas por la que ocurren estos acontecimientos, decidimos eliminarlos ya que los consideramos completamente atípicos, quedando así los diagramas de caja:

### Observaciones del análisis cualitativo:

- 1) El equipo con mayor variabilidad, es decir, con los datos más dispersos es el equipo TKD0137 y mientras que el de menor variabilidad es el TKD0136.
- 2) Los dos últimos equipos (TKD0140 Y TKD0142) poseen aproximadamente la misma dispersión.
- 3) Los datos de duración de detenciones para cada camión están sesgados positivamente. La media es mayor que la mediana y mayor que la moda.
- 4) El camión TKD0137 es el que tiene mayor rango de duración del tiempo de detenciones por fallas imprevistas. El camión TKD0136 tiene menor rango de tiempo de detenciones.
- 5) Las medianas de los tiempos de detención de cada equipo son aproximadamente iguales.

Estas conclusiones las verificaremos con métodos paramétricos y en caso de no poder aplicar métodos paramétricos, aplicaremos métodos no paramétricos con el fin de comparar las medias de los equipos y poder analizar si se comportan de igual manera, de no ser así identificar el/los camiones que difieren.



Gráfica (2): Diagrama de caja y bigote para el tiempo entre fallas.

Para esta prueba no se quitaron los datos atípicos ya que se considera que es normal que exista una diferencia significativa entre los tiempos de fallas. De esta grafica se observa que las medias tienden a ser iguales.

### ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS DATOS:

#### COMPARACION DE TRATAMIENTOS

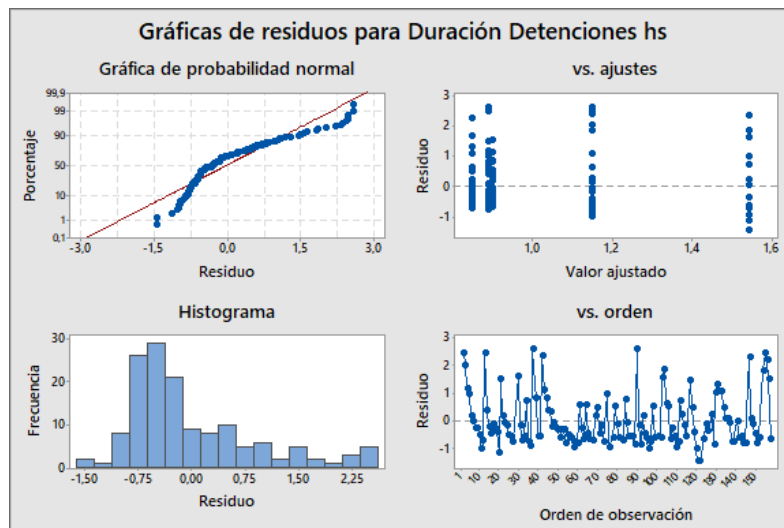
Se busca realizar una comparación entre los cinco tipos de camiones de la flota, para determinar si es válido considerar que todos los camiones provienen de una misma población y así estudiarlos de manera conjunta.

## ● Método Paramétrico:

Para la ejecución de estos métodos es necesario basarnos en una serie de supuestos:

- Para todos los valores de las variables independientes, la varianza de los  $\varepsilon$  (errores experimentales) es constante.
- La distribución de probabilidad del  $\varepsilon$  es normal.
- Los errores son aleatorios e independientes.

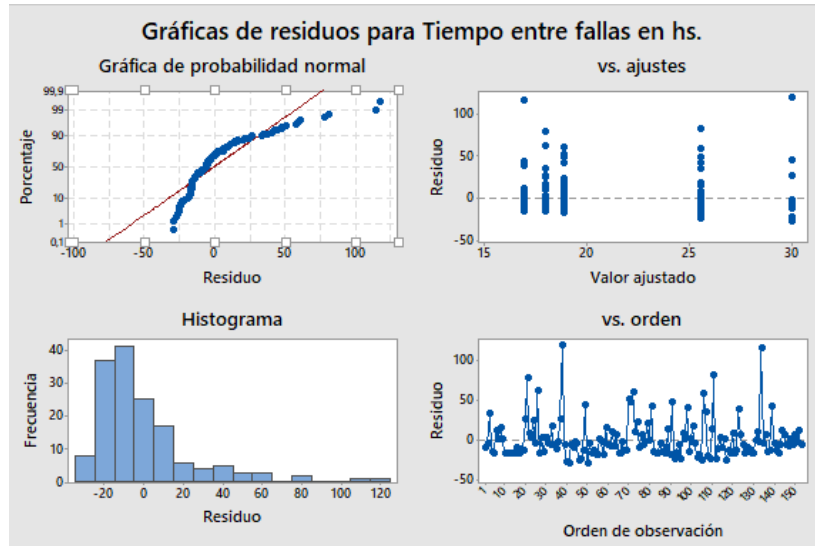
## Análisis de los supuestos:



## Observaciones:

- 1) De la gráfica de probabilidad normal se observa que los errores no se ajustan a una distribución normal.
- 2) Analizando residuos vs. ajustes se nota que los residuos están distribuidos casi simétricos con respecto al origen lo que indica una homogeneidad de varianza de los errores experimentales.
- 3) Del histograma se ve que la distribución de los residuos esta sesgada.
- 4) Analizando residuos vs. Orden de observación, los residuos son completamente aleatorios.

Como conclusión, al no cumplirse el supuesto de normalidad, se invalida la aplicación de los métodos paramétricos por lo cual para continuar el análisis acudimos a métodos no paramétricos.



Observaciones:

- 1) De la gráfica de probabilidad normal se observa que los errores no se ajustan a una distribución normal.
- 2) Analizando residuos vs. ajustes se nota que los residuos no están distribuidos simétricamente con respecto al origen lo que indica que no hay homogeneidad de varianza de los errores experimentales.
- 3) Del histograma se ve que la distribución de los residuos esta sesgada.
- 4) Analizando residuos vs. Orden de observación, los residuos son completamente aleatorios.

A cerca de esto la conclusión es que tampoco se podrían aplicar métodos paramétricos para comparar los tipos de máquinas; se acude a método no paramétricos nuevamente.

### ● Método No Paramétrico:

Dado que no se cumplen los supuestos de normalidad de los errores experimentales y que es conocida la distribución de los datos, nos concentramos en la ubicación de la distribución de probabilidad de la población muestreada, no en sus parámetros, es decir no necesitamos suponer nada acerca de la naturaleza de las poblaciones muestreadas.

### Kruskal- Wallis:

Para ello utilizamos la prueba H de Kruskal- Wallis la cual se asemeja a la prueba F de análisis de varianza, probando las hipótesis:

$H_0$ : Las distribuciones de probabilidad de las k poblaciones (camiones) son idénticas

$H_1$ : Al menos dos de las k distribuciones de probabilidad de población difieren en su ubicación.

**Estadístico de prueba:** 
$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - 3(n+1)$$

Dónde:  $n_i$ : Número de mediciones de la muestra  $i$ .

$T_i$ : Suma de rango para la muestra  $i$ , donde el rango de cada medición se calcula según su Magnitud relativa dentro de la totalidad de datos de la  $k$  muestras.

Asignamos rangos a las  $n_1 + n_2 + \dots + n_k$  observaciones y calculamos las sumas de rangos,  $T_1, T_2, \dots, T_k$  para las  $k$  muestras. Los rangos de las observaciones empatadas se promedian.

$n$ : Tamaño total de las muestras =  $n_1 + n_2 + \dots + n_k$

**Región de rechazo:**  $H > \chi^2_{\alpha}$  con  $(k-1)$  grados de libertad

**Supuestos:**

- 1) Las  $K$  muestras son aleatorias e independientes.
- 2) Las observaciones se pueden ordenar.

### CONFIABILIDAD (ANÁLISIS DE WEIBULL)

La confiabilidad es un tema de suma importancia en el área de la ingeniería, es la probabilidad de que un componente o sistema desempeñe satisfactoriamente la función para la que fue creado durante un periodo establecido y bajo condiciones de operación establecidos. La confiabilidad es calidad en el tiempo. Dado que en nuestro análisis estadístico se debe tener en cuenta la vida útil de un artefacto, en nuestro caso de la maquinaria (Flota de camiones 830E).

Teniendo en cuenta que la confiabilidad es la capacidad que tiene un producto en desempeñar sus funciones propias durante un determinado tiempo, un producto que funciona por mucho tiempo se dice que es confiable.

Las razones de estudio de la confiabilidad de productos son las siguientes:

1. Determinar el tiempo  $t$  hasta el cual se espera que falle una proporción  $p$  dada de los productos en operación. Esto es útil para determinar tiempos de garantía apropiados así como sus costos.
2. Encontrar el tiempo  $t$  al cual se espera que sobreviva una proporción  $1-p$  dada de los productos en operación. Es una estimación de la confiabilidad de los productos.
3. Determinar la propensión a fallar que tienen el producto en un tiempo dado. Para comparar dos o más diseños.
4. Dado que un artículo ha sobrevivido un tiempo  $t_0$ , encontrar la probabilidad de que sobreviva un tiempo  $t$  adicional. Para planear el reemplazo de los equipos.

Es de interés analizar un factor importante que abarca a la confiabilidad de los camiones, este es el **factor de duración** o **vida útil** esperada de cada camión, es decir, el tiempo que se espera que funcionen. Las distribuciones continuas de probabilidad que se usan en el estudio de confiabilidad son la exponencial, la normal y la Weibull.

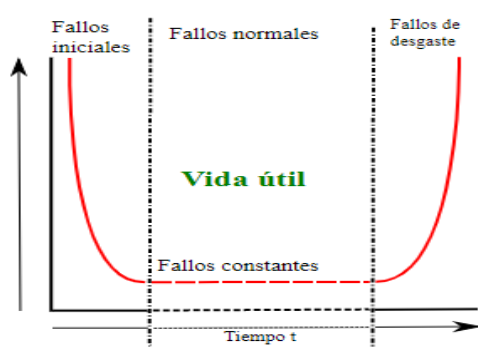
Para esto se llevará a cabo una prueba de bondad de ajuste de los datos generales según lo obtenido en las comparaciones, realizadas con los métodos no paramétricos, y se observará la distribución que mejor se ajusta a los datos.

Para determinar en qué etapa de vida se encuentran las maquinas se analiza la siguiente curva típica “curva de bañera” la cual representa una comparación de las tasas de fallas al transcurrir el tiempo se observan tres etapas por las que pasa nuestro objeto en estudio.

Fallos iniciales: razón de falla decreciente, representa el periodo durante el cual se eliminan los artículos deficientemente fabricados. Para describir la ocurrencia de fallas se usa una distribución Weibull con parámetro de forma  $\beta < 1$ .

Fallos aleatorios: razón de falla constante, se considera como el periodo de vida útil durante el cual únicamente ocurren fallas por azar. Parámetro de forma  $\beta = 1$ .

Fallos por desgaste: razón de falla creciente, en este periodo los componentes fallan por causas de desgaste. Parámetro de forma  $\beta > 1$ .



PERÍODO	ARRANQUE	OPERACIÓN NORMAL	DESGASTE
CAUSA DE LA FALLA	DISEÑO MONTAJE ERRORES DE FABRICA	MALA OPERACIÓN ACCIDENTES	USO CONTINUO ESFUERZO FATIGA
ACCIONES	VERIFICACION Y PRUEBAS DEL MONTAJE	OPERAR CON LAS ESPECIFICACIONES	MEJORAS INSPECCIONES
	MANTENIMIENTO PREVENTIVO		

## MANTENIBILIDAD:

La Mantenibilidad como característica, es la medición de la capacidad que tiene el Sistema de Gestión de Mantenimiento de una organización para restituir o reponer las funciones perdidas en un equipo por la ocurrencia de una falla o por la ejecución de un mantenimiento planificado. Un activo con una alta mantenibilidad es aquel que es fácil de mantener y reparar o también aquel que requiere el mínimo mantenimiento posible.

La primera consideración a tener en cuenta es que la tasa de falla (o probabilidad condicional de falla) debe ser creciente, es decir, la tasa de falla es función de la edad.

En la curva de bañera, esta condición se ubica en la tercera etapa, es decir, en la de envejecimiento, degradación o desgaste.

Para determinar el tiempo óptimo para la ejecución de un mantenimiento preventivo, necesitamos formular un modelo matemático que describa la relación entre los costos y los riesgos. En el desarrollo del modelo se asume que el activo falla antes del tiempo  $t$ , una acción correctiva ocurrirá; y si no falla al tiempo  $t$ , ocurrirá una acción preventiva. En otras palabras, la unidad se reemplaza cuando falla o después de un cierto tiempo de operación  $t$ , lo que ocurra primero.

Entonces el tiempo de reemplazo óptimo se halla minimizando el costo por unidad de tiempo CPUT (t).

El cual está dado por:

$$CPUT(t) = \frac{COSTO\ TOTAL\ ESPERADO\ DE\ REMPLAZO\ POR\ CICLO}{LONGITUD\ DEL\ CICLO\ ESPERADO}$$

$$CPUT(t) = \frac{C_p \cdot R(t) + C_u \cdot [1 - R(t)]}{\int_0^t R(s) ds}$$

Dónde: R (t): Confiabilidad al tiempo t.

C<sub>p</sub>: Costo de reemplazo planificado.

C<sub>u</sub>: Costo de reemplazo no planificado.

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 óptima 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.

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.

## DESARROLLO:

### 1. Prueba de Kruskal-Wallis: Duración Detenciones hs vs. Equipo

#### Estadísticas descriptivas

Equipo	N	Mediana	Clasificación de medias	Valor Z
TKD01 35	35	0,4833 3	62,7	-1,53
TKD01 36	33	0,7166 7	76,3	0,69
TKD01 37	15	1,1333 3	91,2	1,90
TKD01 40	34	0,6333 3	73,4	0,23
TKD01 42	26	0,6166 7	66,0	-0,81
General	14		72,0	

3

## Prueba

Hipótesis nula  $H_0$ : Todas las medianas son iguales

Hipótesis alterna  $H_1$ : Al menos una mediana es diferente

Método	G L	Valor H	Valor p
No ajustado para empates	4	5,93	0,205
Ajustado para empates	4	5,93	0,204

Estadístico de prueba:  $H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - 3(n+1) = 5,93$

Región de rechazo:  $H > \chi^2_{\alpha}$  con  $(k-1)$  grados de libertad  $\chi^2_{0,05;4} = 9,488$   
 $5,93 < 9,488 \rightarrow$  NO rechazamos  $H_0$ .

### Con el Valor-p:

Región de rechazo: Valor-p <  $\alpha$  entonces, se rechaza  $H_0$ .

$0,205 > 0,05 \rightarrow$  NO rechazamos  $H_0$ .

Al aceptar  $H_0$ , efectivamente concluimos que todas las medianas son iguales, lo que nos dice que los 5 tipos de camiones se comportan de manera similar

Prueba de Kruskal-Wallis: Tiempo entre fallas en hs. vs. Equipos

Estadísticas descriptivas

Equipos	N	Mediana	Clasificación de medias	Valor Z
TKD0135	38	12,3833	77,4	0,07
TKD0136	36	11,6583	73,5	-0,54
TKD0137	15	23,4333	88,3	1,04
TKD0140	36	10,8583	69,6	-1,15
TKD0142	28	17,1000	84,4	0,98
General	153		77,0	

## 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	4	3,00	0,558

Ajustado para empates 4 3,00 0,558

Estadístico de prueba:  $H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - 3(n+1) = 3,00$

Región de rechazo:  $H > \chi^2_{\alpha}$  con (k-1) grados de libertad  $\chi^2_{0,05;4} = 9,488$   
 $3,00 < 9,488 \rightarrow$  NO rechazamos  $H_0$ .

Con el Valor-p:

Región de rechazo: Valor-p <  $\alpha$  entonces, se rechaza  $H_0$ .

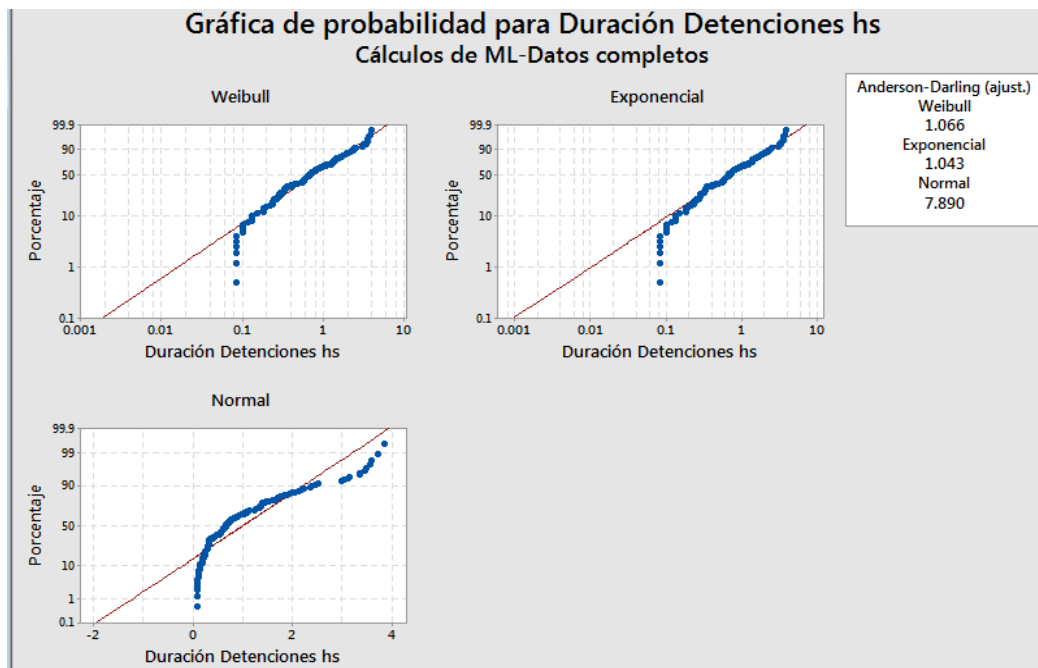
$0,205 > 0,05 \rightarrow$  NO rechazamos  $H_0$ .

Al aceptar  $H_0$ , efectivamente concluimos que todas las medianas son iguales, lo que nos dice que los 5 tipos de camiones se comportan de manera similar

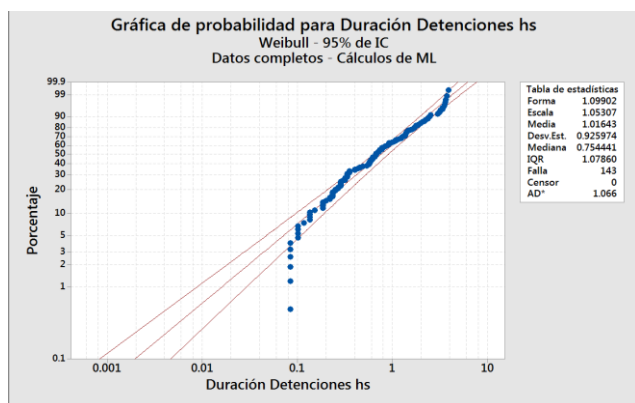
*Gracias a esta información podemos concluir que al comportarse los cinco tipos de camiones, de manera similar, todos se encuentran en la misma etapa de tasa de falla. Entonces para continuar con el desarrollo, se considera que todos los camiones provienen de la misma población, por lo que para los siguientes estudios de Mantenibilidad y Confiabilidad se toman los datos como si fueran de un solo tipo de camión.*

## 2. Mantenibilidad:

Para realizar este estudio, fue necesario analizar la distribución que mejor se ajusta a los datos.

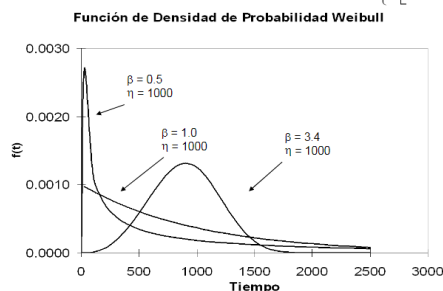


De lo observado de gráficas, los datos se ajustan a una distribución weibull y exponencial, por conveniencia tomamos la distribución weibull.



## Distribución Weibull

$$\text{Función de Distribución Weibull } f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\left[\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right]\right\}$$



Valores de parámetros: Forma ( $\beta$ )=1,09902. Escala ( $\delta$ )=1,05307

Con estos datos obtenidos por el software del minitab se puede calcular estimaciones del tiempo medio de la duración de detenciones (TMD).

### Estimación puntual:

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

Entonces se tiene: TMD= 1,010947 horas

### Estimación por intervalo de confianza:

Duración Detenciones hs

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

Estadísticas

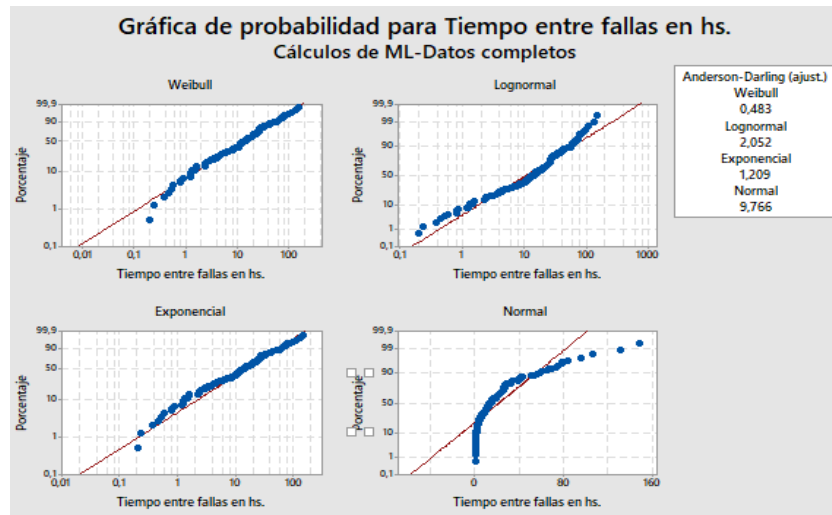
Variable	N	Media	Desv.Est.
Duración Detenciones hs	143	1,014	0,952

Intervalo de tolerancia de 95%

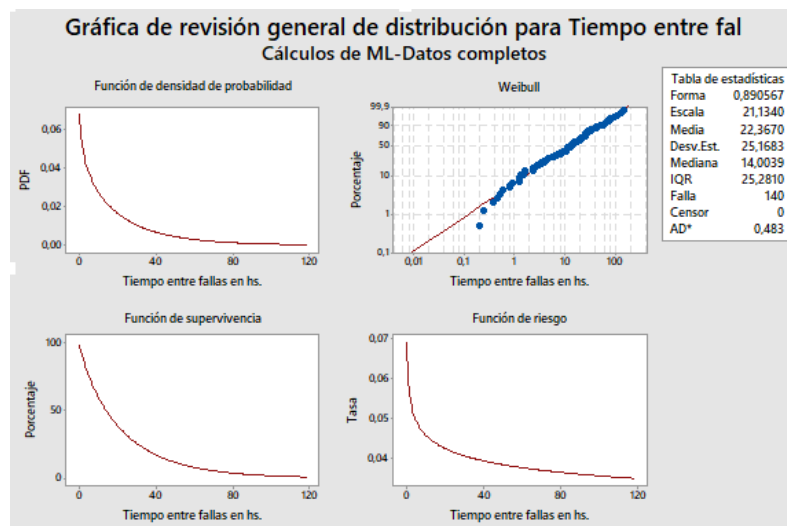
Variable	Método Weibull	de Método no paramétrico	Confianza lograda
Duración Detenciones hs	(0,021; 4,244)	(0,083; 3,717)	97,61%

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

### 3. Confiabilidad:



De grafico se observa que la distribución a la que mejor se ajustan los tiempos entre falla es la distribución de Weibull.



Analizando los parámetros de la distribución de Weibull se ve que el factor de forma  $\beta=0,890567$ , y por la curva de bañera decimos que los equipos se encuentran en las fallas iniciales, por cual podemos decir que las maquinas tuvieron fallas por fabrica, componentes u otros factores desconocidos.

Adicionalmente se calcula el Tiempo Medio Entre Fallas (TME).

**Estimación puntual:**

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

Valores de parámetros: Forma ( $\beta$ )=0,890567. Escala ( $\delta$ )=21,1340

Entonces TME= 22,1907 horas

## Estimación por intervalo de confianza:

Tiempo entre fallas en hs.

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

Estadísticas

Variable	N	Media	Desv.Est.
Tiempo entre fallas en hs.	140	22,392	25,703

Intervalo de tolerancia de 95%

Variable	Método Weibull	de	Método paramétrico	no	Confianza lograda
Tiempo entre fallas en hs.	(0,167; 118,745)		(0,200; 131,217)		97,31%

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

## 4. Disponibilidad:

Disponibilidad =  $TME / (TME + TMD) = 0,9567$

Este resultado va a indicar la probabilidad de que en un 95,67% el equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables, considerando el tiempo total.

## CONCLUSIONES:

Para concluir se puede indicar que se han desarrollado modelos predictivos exactos para las variables de interés, y con esto poder disminuir la presencia de fallas y planificar una adecuada actividad de mantenimiento hacia la flota de camiones mineros, y así disminuir los costos por indisponibilidad.

Cabe destacar que solo analizamos las fallas imprevistas, siendo que existen otros tipos de falla, tales como: Programada (P), Operacionales (O) y Otros (T).

Por otra parte esperábamos encontrar alguna diferencia entre cada tipo de camiones, ya que no conocíamos su proveniencia ni uso histórico, consideramos importante que haya que realizarle el mismo mantenimiento preventivo a cada una de las máquinas; idealmente se debería realizar a cada uno de los camiones el mismo análisis para así poder hacer un seguimiento del estado de cada uno de ellos.

## BIBLIOGRAFIA:

- Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. Roberto O. Kuehl.
- Análisis y diseño de experimentos. Humberto Gutiérrez Pulido- Román de la Vara Salazar
- Probabilidad y Estadística para Ingeniería Y Ciencia- Walpole-Meyers-Novena edición.
- Apuntes de la cátedra Estadística Experimental-Facultad de Ingeniería UNSa.

## ANEXOS

Flota de 22 camiones 830E 5000US\$/h

	Nominal	nominal	nominal	Continua	nominal	Continua		
Fecha	Equipo	Entrada	Salida	Duración Detencione s hs	Clase Evento	Costos Rptos	Costo Indisponibili dad	Costo Total
01-Mar-05	TKD014 2	20:41	04:32	7,85	I	449	39.250	39.699
31-Mar-05	TKD014 2	19:49	20:00	0,18	I	546	917	1.463

Durante el periodo de un mes se tomaron los tiempos de detención de la muestra de 22 camiones de 5 tipos diferentes, TKD0135, TKD0136, TKD0137, TKD0140, TKD0142, por fallas imprevistas (el tiempo inicia en la entrada y finaliza en la salida de reparación de cada camión) y se evaluaron sus respectivos costos debido a gastos por repuestos y costos por estar indisponibles en la producción.