

**ESTABLECIMIENTO DE LA VIDA OPTIMA DE COMPONENTES DE LA FLOTA
DE TRACTORES D10T DE LA MINA CALENTURITAS USANDO WEIBULL**

MIGUEL ANDRÉS QUIROGA PALACIOS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACION EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2014**

**ESTABLECIMIENTO DE LA VIDA OPTIMA DE COMPONENTES DE LA FLOTA
DE TRACTORES D10T DE LA MINA CALENTURITAS USANDO WEIBULL**

MIGUEL ANDRÉS QUIROGA PALACIOS

**Monografía de grado presentada como requisito para optar por el título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento**

Director

PEDRO ALONZO JIMENEZ JARA

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACION EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2014**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la vida y por ser guía permanente.

A mi esposa Marcela y mis hijas Sara Catalina y Laura Juliana por su amor, por ser fuente de inspiración inagotable, por su apoyo, paciencia y comprensión.

A mi familia, especialmente papá y mamá por su apoyo incondicional.

Al Proyecto Gecolsa Calenturitas por el gran aprendizaje y por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	14
1. MARCO TEORICO.....	15
1.1 DISTRIBUCION WEIBULL.....	15
1.1.1 Función de Confiabilidad $R(t)$	17
1.1.2 Función de Densidad de Probabilidad de Fallas $f(t)$	18
1.1.3 Función de Tasa de Falla.....	19
1.1.4 Parámetros de Vida Útil y Reparaciones en Weibull.....	20
1.2 EL TRACTOR CATERPILLAR D10T.....	21
1.2.1 Motor.....	23
1.2.2 Tren de Potencia.....	23
1.2.3 Sistema de Enfriamiento.....	26
2. METODOLOGIA.....	28
3. ANALISIS DE VIDA DE COMPONENTES USANDO WEIBULL.....	30
3.1 POBLACION DE TRACTORES D10T MINA CALENTURITAS.....	30
3.2 RECOPIACION Y FILTRADO DE LA INFORMACION.....	31
3.3 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE MOTOR.....	33
3.4 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE CONVERTIDOR.....	39
3.5 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE LA TRANSMISIÓN.....	44
3.6 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE MANDOS FINALES.....	49
3.7 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE RADIADORES.....	54
3.8 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE CILINDROS DE LEVANTE DE HOJA TOPADORA.....	59
3.9 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE CILINDROS DE INCLINACION DE HOJA TOPADORA.....	65
3.10 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE CILINDROS DE LEVANTE DE DESGARRADOR.....	70
3.11 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE CILINDROS DE INCLINACION DE DESGARRADOR.....	75
3.12 RESUMEN DE ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE COMPONENTES DE TRACTORES D10T MINA CALENTURITAS.....	78
3.13 SIMULACION Y COMPARACIÓN.....	78
4. CONCLUSIONES.....	94
BIBLIOGRAFIA.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetro de forma Weibull asociado a la curva de la bañera.	17
Tabla 2. Características principales D10T.	22
Tabla 3. Población de Tractor D10T en la mina Calenturitas.	30
Tabla 4. Resumen de datos de reemplazo de componentes antes de filtrado.	32
Tabla 5. Resumen de datos de reemplazo de componentes ya filtrados.	33
Tabla 6. Detalle de los motores reemplazados. Datos válidos.	34
Tabla 7. Detalle de los motores reemplazados. Datos filtrados, no válidos.	34
Tabla 8. Detalle de los convertidores de par reemplazados. Datos válidos.	39
Tabla 9. Detalle de los convertidores de par reemplazados. Datos filtrados, no válidos.	39
Tabla 10. Detalle de las transmisiones reemplazadas. Datos válidos.	44
Tabla 11. Detalle de las transmisiones reemplazadas. Datos filtrados, no válidos.	44
Tabla 12. Detalle de los mandos finales reemplazados. Datos válidos.	49
Tabla 13. Detalle de los mandos finales reemplazadas. Datos filtrados, no válidos	50
Tabla 14. Detalle de los radiadores reemplazados. Datos válidos.	55
Tabla 15. Detalle de los radiadores reemplazados. Datos filtrados, no válidos.	55
Tabla 16. Detalle de los cilindros de levante de dozer reemplazados. Datos válidos	60
Tabla 17. Detalle de los cilindros de levante de dozer reemplazados. Datos filtrados, no válidos.	61
Tabla 18. Detalle de los cilindros de inclinación de dozer reemplazados. Datos filtrados, no válidos	65
Tabla 19. Detalle de los cilindros de inclinación de dozer reemplazados. Datos válidos.	66
Tabla 20. Detalle de los cilindros de levante de ripper reemplazados. Datos filtrados, no válidos.	70
Tabla 21. Detalle de los cilindros de levante de ripper reemplazados. Datos	71

válidos.

Tabla 22. Detalle de los cilindros de inclinación de ripper reemplazados. Datos filtrados, no válidos	75
Tabla 23. Detalle de los cilindros de inclinación de ripper reemplazados. Datos válidos.	76
Tabla 24. Tabla resumen de resultados.	78
Tabla 25. Resumen de simulación de proyección de componentes necesarios hasta fin de contrato de la flota D10T.	79
Tabla 26. Simulación y comparación de reemplazos de motor futuros hasta fin de contrato.	81
Tabla 27. Simulación y comparación de reemplazos de convertidor futuros hasta fin de contrato.	82
Tabla 28. Simulación y comparación de reemplazos de transmisión futuros hasta fin de contrato.	83
Tabla 29. Simulación y comparación de reemplazos de mandos finales LH futuros hasta fin de contrato.	83
Tabla 30. Simulación y comparación de reemplazos de mandos finales RH futuros hasta fin de contrato.	85
Tabla 31. Simulación y comparación de reemplazos de Radiadores futuros hasta fin de contrato.	86
Tabla 32. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Levante de Dozer Izquierdos futuros hasta fin de contrato.	87
Tabla 33. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Levante de Dozer Derechos futuros hasta fin de contrato.	88
Tabla 34. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Inclinación de Dozer Izquierdos futuros hasta fin de contrato.	89
Tabla 35. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Inclinación de Dozer Derechos futuros hasta fin de contrato.	90
Tabla 36. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Levante de Ripper Izquierdos futuros hasta fin de contrato.	91
Tabla 37. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Inclinación de Ripper Izquierdos futuros hasta fin de contrato.	92
Tabla 38. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Inclinación de Ripper Derechos futuros hasta fin de contrato.	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación general curva de la bañera.	17
Figura 2. Ecuación de Weibull.	18
Figura 3. Función de Confiabilidad para la Distribución Weibull.	18
Figura 4. Ecuación de la función de densidad de probabilidad de fallas.	18
Figura 5. Función de densidad de probabilidad de fallas para la distribución Weibull.	19
Figura 6. Ecuación de la función de tasa de fallas.	19
Figura 7. Función de tasa de fallas para la distribución Weibull.	20
Figura 8. Fotografía general de un D10T típico.	21
Figura 9. Motor C27 de un tractor D10T.	23
Figura 10. Localización de componentes del tren de potencia.	24
Figura 11. Componentes principales del tren de potencia y motor D10T.	25
Figura 12. Sistema de enfriamiento.	26
Figura 13. Pasos a seguir para el análisis de ciclo de vida de componentes.	28
Figura 14. Diagrama de flujo para la definición de intervalos óptimos de reemplazo de componentes.	29
Figura 15. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para motores D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013.	35
Figura 16. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Motores D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013.	36
Figura 17. Gráfica de tasa de fallas de Motores D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013.	37
Figura 18. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Motores D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013.	38
Figura 19. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para convertidores de par D10T de la mina Calenturitas. Febrero 2010 - Diciembre 2013.	40
Figura 20. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Convertidores de Par D10T de la mina Calenturitas. Febrero 2010 a Diciembre 2013.	41
Figura 21. Gráfica de tasa de fallas de Convertidores de Par D10T de la mina Calenturitas. Febrero 2010 a Diciembre 2013.	42

Figura 22. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Convertidores de Par D10T de la mina Calenturitas. Febrero 2010 a Diciembre 2013.	43
Figura 23. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para transmisiones de D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 - Diciembre 2013.	45
Figura 24. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Transmisiones D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 a Diciembre 2013.	46
Figura 25. Gráfica de tasa de fallas de transmisiones D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 a Diciembre 2013.	47
Figura 26. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Transmisiones D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 a Diciembre 2013.	48
Figura 27. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para mandos finales de D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 - Diciembre 2013.	51
Figura 28. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Mandos Finales D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013.	52
Figura 29. Gráfica de tasa de fallas de mandos finales D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013.	53
Figura 30. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Mandos Finales D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013.	54
Figura 31. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para radiadores de D10T de la mina Calenturitas. Junio 2010 - Diciembre 2013.	56
Figura 32. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Radiadores D10T de la mina Calenturitas. Junio 2010 a Diciembre 2013.	57
Figura 33. Gráfica de tasa de fallas de radiadores D10T de la mina Calenturitas. Junio 2010 a Diciembre 2013.	58
Figura 34. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Radiadores D10T de la mina Calenturitas. Junio 2010 a Diciembre 2013.	59
Figura 35. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para cilindros de levante de dozer de D10T de la mina Calenturitas. Enero 2010 - Diciembre 2013.	61
Figura 36. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Cilindros de Levante de Dozer D10T de la mina Calenturitas. Enero 2010 a Diciembre 2013.	62
Figura 37. Gráfica de tasa de fallas de cilindros de levante de Dozer D10T de la mina Calenturitas. Enero 2010 a Diciembre 2013.	63
Figura 38. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Cilindros de levante de Dozer D10T de la mina Calenturitas. Enero 2010 a Diciembre 2013.	64
Figura 39. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para cilindros de inclinación de dozer de D10T de la mina Calenturitas. Diciembre 2009 - Diciembre 2013.	67

Figura 40. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Cilindros de Inclinación de Dozer D10T de la mina Calenturitas. Diciembre 2009 a Diciembre 2013.	68
Figura 41. Gráfica de tasa de fallas de Cilindros de Inclinación de Dozer D10T de la mina Calenturitas. Diciembre 2009 a Diciembre 2013.	69
Figura 42. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Cilindros de Inclinación de Dozer D10T de la mina Calenturitas. Diciembre 2009 a Diciembre 2013.	70
Figura 43. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para cilindros de levante de ripper de D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 - Diciembre 2013.	72
Figura 44. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Cilindros de Levante de Ripper D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 a Diciembre 2013.	73
Figura 45. Gráfica de tasa de fallas de Cilindros de Levante de Ripper D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 a Diciembre 2013.	74
Figura 46. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Cilindros de Levante de Ripper D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 a Diciembre 2013.	75
Figura 47. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para cilindros de inclinación de ripper de D10T de la mina Calenturitas. Enero 2011 - Diciembre 2013.	77
Figura 48. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Cilindros de Inclinación de Ripper D10T de la mina Calenturitas. Enero 2011 a Diciembre 2013.	77

RESUMEN

TITULO: ESTABLECIMIENTO DE LA VIDA OPTIMA DE COMPONENTES DE LA FLOTA DE TRACTORES D10T DE LA MINA CALENTURITAS USANDO WEIBULL.*

AUTOR: MIGUEL ANDRES QUIROGA PALACIOS.**

PALABRAS CLAVE: WEIBULL, GECOLSA CALENTURITAS, VIDA DE COMPONENTES, VIDA UTIL, CONFIABILIDAD, MANTENIMIENTO, TRACTOR.

DESCRIPCION O CONTENIDO: Esta monografía desarrolla un método para la determinación de valores reales de vida útil de componentes de un equipo minero, de una mina específica, utilizando la historia disponible de reemplazo de componentes y un software estadístico capaz de realizar análisis de confiabilidad, usando la distribución de probabilidad de Weibull. Los valores obtenidos en horas de vida de componentes permiten realizar planes de cambio de componentes eficientes en términos del aprovechamiento máximo de la vida del componente, sin afectar la confiabilidad de la máquina por cambios prematuros o tardíos que impliquen fallas catastróficas. La utilización de estos valores de vida óptimos, junto con un correcto monitoreo de condiciones de los componentes, reducen los costos de mantenimiento de equipos, al lograr realizar los reemplazos de componentes cuando las condiciones de desgaste o parámetros de monitoreo lo exigen evitando llegar a fallas catastróficas.

El caso de estudio se desarrolla con una flota de doce tractores mineros Caterpillar modelo D10T de la mina Calenturitas. Sin embargo este método puede ser utilizado en otras industrias o minas que administren el mantenimiento de flotas de equipos y quieran mejorar la confiabilidad de los mismos por medio de un plan de cambio de componentes, definiendo con este método las frecuencias optimas de reemplazo de los mismos.

En esta monografía se analizan los datos históricos de reemplazo de los componentes que mayor impacto tienen en el costo de mantenimiento de un D10T, y se utiliza Weibull para determinar su vida óptima. Con esta información se proponen nuevas frecuencias de cambio, que permitan mejorar la confiabilidad del equipo sin impactar negativamente los costos de mantenimiento por reemplazos excesivos o fallas catastróficas por expectativas de vida superiores a las reales.

*Monografía.

**Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.
Director: Ing. Pedro Alonso Jiménez Jara.

SUMMARY

TITLE: OPTIMUM COMPONENTS LIFE ESTABLISHMENT OF D10T CALENTURITAS MINE SITE TRACTORS FLEET USING WEIBULL.*

AUTHOR: MIGUEL ANDRES QUIROGA PALACIOS.**

KEY WORDS: WEIBULL, GECOLSA CALENTURITAS, COMPONENTS LIFE, LIFE, RELIABILITY, MAINTENANCE, TRACTOR

DESCRIPTION OR CONTENT: This paper develops a method for determining actual real values of component life of mining equipment, in a specific mine, using the available history of replacement components and a statistical software capable of performing reliability analysis, using Weibull probability distribution. The values obtained in hours of components life allow performing efficient plans change components in terms of optimization of component life, without compromising the reliability of the machine by premature or late changes involving catastrophic failures. Using these optimal values of life along with proper condition monitoring of components, reduce maintenance costs of equipment, accomplishing components replacements when worn conditions or monitoring parameters suggest that it is required avoiding reaching catastrophic failures.

Case study is developed with a fleet of twelve miner Caterpillar tractors model D10T of Calenturitas mine site. However, this method can be used in other industries or mines that manage equipment fleet maintenance and want to improve reliability by using a change components plan, defining with this method the optimal frequency of replacement thereof.

In this monograph the historical components replacement data of those that have the greatest impact on the cost of maintaining a D10T are analyzed and Weibull is used to determine their optimal life. With this information, new change frequencies are proposed to improve equipment reliability without negatively impacting maintenance costs by excessive replacements or catastrophic failures due to higher expectations over of real life.

*Monograph.

**Mechanical Engineering School. Specialization in Maintenance Management. Director: Ing. Pedro Alonso Jiménez Jara.

INTRODUCCION

Desde el inicio de un contrato MARC (Maintenance and Repair Contract) se define la vida de los componentes mayores de los equipos, basados en modelos teóricos y la experiencia de fábrica (Caterpillar) en el comportamiento de sus equipos en otros proyectos mineros alrededor del mundo. De esta manera se calcula el costo por hora de mantenimiento de un modelo específico durante su vida útil y este cálculo mas el margen de rentabilidad dará la tarifa final que se cobrará al cliente.

Sin embargo, en la realidad, cuando un equipo inicia operaciones, el costo de mantenimiento real y la vida de los componentes, se ve afectado por diversas variables propias de cada mina y cliente específicos. Algunos de estos factores son:

- Nivel de experiencia de los operadores directos del equipo.
- Nivel de experiencia del personal técnico que realiza el mantenimiento.
- Severidad de la aplicación que tiene el equipo.
- Nivel de madurez de la operación de producción.
- Nivel de madurez de la relación entre el distribuidor y el cliente.
- Problemas de producto de los equipos.
- Legislación del gobierno en cuanto a aranceles e impuestos que afectan el costo de los repuestos.

Un contrato MARC entra entonces en vigencia o inicio de operaciones bajo costos teóricos hechos con base en pronósticos de expectativas de vida, que si no se cumplen pueden afectar seriamente la estabilidad económica del distribuidor. Si los ciclos de vida fueron supuestos demasiado largos, entonces el número de reemplazos durante la vigencia del contrato aumentará e igualmente lo harán los costos. Si se tiene en cuenta que este tipo de contratos administra flotas de equipos más que equipos individuales, entonces se entiende el riesgo que administra el distribuidor. Por el contrario, si los ciclos de vida se suponen demasiado cortos, el número de reemplazos durante la vigencia del contrato será inferior al calculado y el distribuidor tendrá un margen de ganancia mayor. En este caso el cliente podría sentirse afectado y las relaciones y estabilidad de los negocios se pueden llegar a ver comprometidos en un mercado que es muy competitivo a nivel mundial.

Se requiere entonces determinar intervalos de reemplazo de componentes reales para un proyecto específico utilizando un modelo sistémico consistente en la aplicación de herramientas estadísticas a los datos de reemplazo de componentes del proyecto desde su inicio hasta el tiempo actual. Esta información podrá ser utilizada en el futuro con fines comerciales como la determinación de nuevas tarifas reduciendo el riesgo asociado al distribuidor. También se puede utilizar para modificar el programa vigente de reemplazo de componentes de los equipos que

se encuentran dentro del contrato antes que este llegue a su fin asegurando la rentabilidad y viabilidad del negocio hasta su fin.

La presente monografía desarrolla una metodología para determinar los intervalos óptimos de reemplazo de componentes de una flota de 11 tractores CAT D10T, algunos de ellos en operación desde Abril de 2008. Estos equipos se encuentran bajo contrato MARC vigente hasta el momento en que alcancen 42.000 horas de uso cada uno; esto es aproximadamente 7 años de operación.

El primer paso en el análisis propuesto es la recolección de la información histórica de reemplazo de componentes de estos equipos desde inicio de operación hasta Diciembre de 2013 como fecha de corte. El segundo paso es la depuración de esta información filtrando reemplazos debidos a abusos del operador, accidentes, daños contingentes y fallas durante periodos de garantía de componentes nuevos o reparados. Una vez se tienen los datos filtrados y considerados válidos, se introducen en un Software de análisis estadístico. En este caso se uso Minitab 15 para el desarrollo de estadísticas de confiabilidad y supervivencia utilizando la distribución de probabilidad de Weibull. El programa arroja entonces los resultados de vida real de componentes calculados con los datos específicos introducidos.

La utilización de estos nuevos intervalos de reemplazo de componentes para una aplicación de equipo, cliente y mina específicos, asegura el aprovechamiento de la vida de los componentes evitando su remoción temprana. Igualmente evita fallas catastróficas por sobreestimación de la vida útil de los componentes. De esta forma se incrementa la eficiencia de la operación de mantenimiento con impactos positivos a los costos de mantenimiento de los equipos.

Por supuesto la sola aplicación de los intervalos obtenidos usando Weibull no aseguran el reemplazo de componentes antes de falla o en el momento adecuado. Se necesita el acompañamiento constante del monitoreo de condiciones que mida la salud de los componentes e indique su reemplazo siempre que sea preciso.

1. MARCO TEORICO

Con el objetivo de determinar la vida útil real de los componentes mayores de los tractores modelo D10T de la mina Calenturitas de forma sistémica, utilizando los datos históricos reales del proyecto y evitando la utilización de promedios aritméticos como único parámetro; se realizará al análisis de los datos utilizando la distribución de Weibull que puede modelar mucho mejor la vida útil de los componentes. A continuación se describen las características principales de esta distribución:

1.1 DISTRIBUCION WEIBULL

La distribución Weibull es muy útil para representar la vida de los componentes. Fue desarrollada por el matemático sueco Waloddi Weibull y presentada en 1951 a la ASME (American Society of Mechanical Engineers) ilustrando siete casos de estudio que iban desde la resistencia del acero a la estatura de los hombres adultos en las islas británicas (The new Weibull Handbook, Robert Abernethy, 2006).

La distribución de Weibull posee en su forma general tres parámetros, lo que le da una gran flexibilidad y cuya selección y ajuste adecuado permiten obtener mejores ajustes que con otras distribuciones (Rojas, 1975). Estos parámetros son:

- Gamma – Parámetro de posición (γ): El más difícil de encontrar y por este motivo se asume con demasiada frecuencia como cero. Indica el lapso de tiempo en que la probabilidad de falla es nula (Forcadas, 1983, 42). Es considerado el tiempo de vida mínima y define el punto de partida u origen de la distribución.
- Eta – Parámetro de escala o característica de vida útil (η): Su valor es determinante para fijar la vida útil del producto o del sistema. Cuanto más alto, las máquinas pueden ser más robustas o de trabajos de mayor duración.
- Beta – Parámetro de forma (β): Refleja la dispersión de los datos y determina la forma que toma la distribución.

El parámetro β permite a la distribución de Weibull tomar diversas formas: cuando β es inferior a 1 se le denomina a esta fase como de mortalidad infantil (tasa de falla decreciente); cuando toma valores cercanos a 1 se describe la fase con el nombre de vida útil (tasa de falla constante y aleatoria), y en el evento de β con valores superiores a 1, se conoce la fase como de envejecimiento o desgaste (tasa de falla creciente) (Diaz, 1992).

En la tabla 1 se muestra un resumen de los períodos de la curva de la bañera, asociados al parámetro β de la distribución de Weibull.

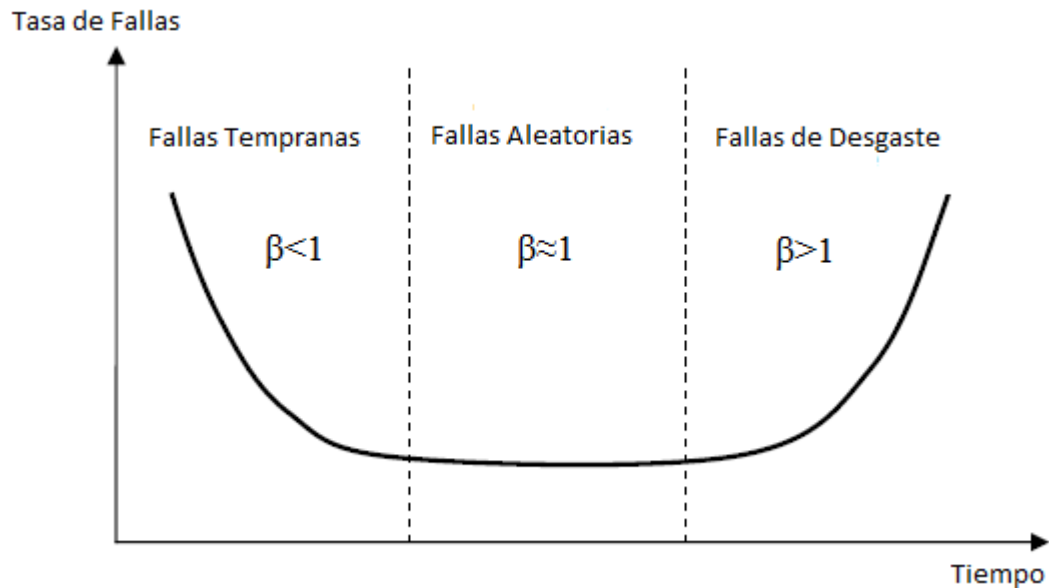
Tabla 1. Parámetro de forma Weibull asociado a la curva de la bañera.

Valor (β)	Característica
$\beta < 1$	Tasa de falla decreciente (Mortalidad Infantil)
$\beta \approx 1$	Tasa de falla constante (Independiente de la edad)
$\beta > 1$	Tasa de falla creciente (Desgaste)

Fuente. DIAZ MATALOBOS, Ángel.

En la figura 1 se muestra una representación general de la curva de la bañera y su relación con el parámetro β .

Figura 1. Representación general curva de la bañera



Fuente. Adaptado de The New Weibull Handbook, Abernethy 2006

A continuación se presentan las principales características de esta distribución:

1.1.1 Función de Confiabilidad R(t)

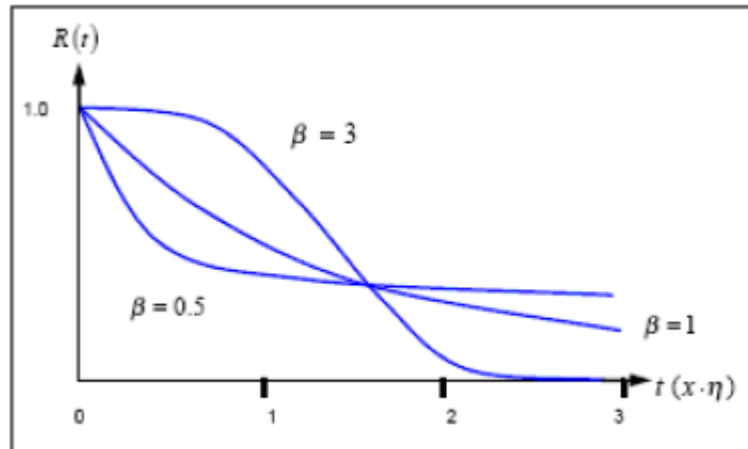
La siguiente es la ecuación de la función de confiabilidad para la distribución Weibull y su gráfica en la Figura 3.

Figura 2. Ecuación de Weibull.

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

Fuente. O'CONNOR, Patrick

Figura 3. Función de Confiabilidad para la Distribución Weibull.



Fuente. O'CONNOR, Patrick

1.1.2 Función de Densidad de Probabilidad de Fallas $f(t)$

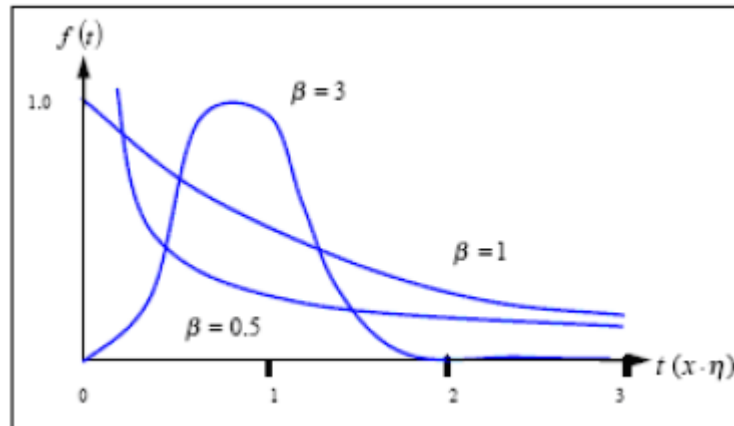
También se le conoce como Falla instantánea en el tiempo t . La siguiente es la ecuación de la función de densidad de probabilidad de fallas para la distribución Weibull y su gráfica.

Figura 4. Ecuación de la función de densidad de probabilidad de fallas.

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

Fuente. O'CONNOR, Patrick

Figura 5. Función de densidad de probabilidad de fallas para la distribución Weibull.



Fuente. O´CONNOR, Patrick

1.1.3 Función de Tasa de Falla

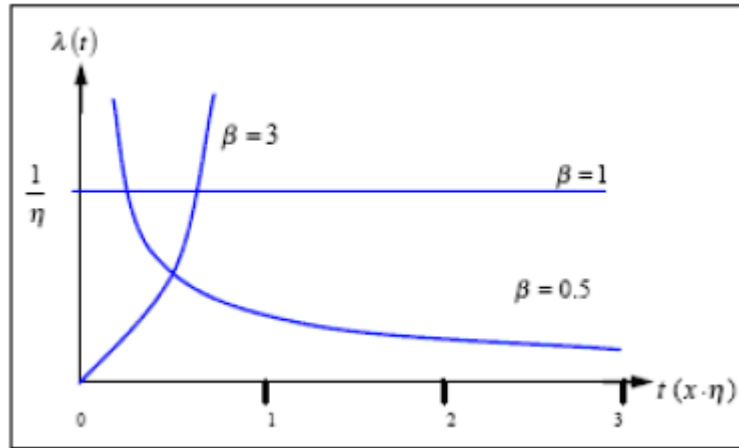
La tasa de falla representa la cantidad de averías o reparaciones por unidad de tiempo que ocurren en el tiempo en que se estudia el elemento. La siguiente es la ecuación de la función de tasa de fallas para la distribución Weibull y su gráfica.

Figura 6. Ecuación de la función de tasa de fallas.

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

Fuente. O´CONNOR, Patrick

Figura 7. Función de tasa de fallas para la distribución Weibull.



Fuente. O'CONNOR, Patrick

1.1.4 Parámetros de Vida Útil y Reparaciones en Weibull

La vida útil o tiempo medio entre fallas MTBF se puede estimar a partir de:

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

Donde MTBF es el tiempo medio entre fallas, R(t) es la función de confiabilidad y F(t) es la función de no confiabilidad.

$$\text{MTBF} = \eta * \text{FunciónGamma} \left(1 + \frac{1}{1 + \beta} \right),$$

Donde Eta η es el parámetro de escala y β es el de forma, con función Gamma para la estimación.

El tiempo medio de reparación MTTR se estima como sigue:

$$\text{Esperanza (TTR)} = \text{MTTR} = \int_0^{\infty} M(t) dt$$

Donde MTTR es el tiempo medio de reparaciones con M(t) como función de Mantenibilidad. Además:

$$\text{MTTR} = \eta * \text{FunciónGamma} \left(1 + \frac{1}{1 + \beta} \right)$$

Donde Eta η es el parámetro de escala y β el de forma, con función Gamma para la estimación.

En general es más preciso cuando se trabaja con distribuciones que con cálculos puntuales, ya que existe un solo valor de β y η para un mismo valor de MTBF al igual que ocurre con el MTTR.

La aplicación de la distribución de Weibull a los datos históricos de reemplazo de componentes del proyecto por medio de Software especializado como Minitab permitirá definir los intervalos óptimos de reemplazo de componentes para el modelo D10T en el proyecto Calenturitas.

1.2 EL TRACTOR CATERPILLAR D10T

Figura 8. Fotografía general de un D10T típico.



Fuente. SERV1816 Caterpillar Service Training D10T Track Type Tractor.

El modelo D10T es un tractor de cadenas con mando final elevado que puede o no tener desgarrador. Su aplicación principal es en el sector de minería a cielo abierto por su tamaño y características. Está diseñado para empujar cargas de hasta 1000kN o 225 kLbf con su hoja topadora de 18, 22 o 45m³ según la aplicación. También puede manejar la misma carga con el desgarrador. Datos tomados del manual de rendimiento Caterpillar edición 42.

En la mina Calenturitas estos tractores son utilizados para adecuación de los botaderos, desgarre de mantos de carbón, limpieza de las plazas de cargue y manejo de las pilas de carbón para el cargue del mismo principalmente.

En la tabla 2 se muestran las principales características del equipo.

Tabla 2. Características principales D10T.

MODELO D10T		
Características	Sistema Internacional	Sistema Inglés
Potencia al Volante	433 kW	580 hp
Peso en trabajo	66451 kg	146500 lb
Modelo de motor	C27 ACERT	
RPM nominales del motor	1800	
Número de Cilindros	12	
Calibre	137 mm	5,4 pulg
Carrera	152 mm	6 pulg
Cilindrada	27 L	1647,5 pulg ²
Rodillos Inferiores	8 a cada lado	
Ancho de zapata estándar	610 mm	24 pulg
Longitud de Cadena en el Suelo	3,88 m	12 pies 9 pulg
Área de Contacto con el Suelo	4,74 m ²	7347 pulg ²
Entrevía	2,55 m	8 pies 4 pulg
DIMENSIONES GENERALES		
Altura incluyendo techo ROPS	4,26 m	14 pies
Longitud Total con hoja SU y desgarrador SS	9,16m	30 pies 1 pulg
Ancho con muñón	3,74 m	12 pies 3 pulg
Espacio Libre Sobre el Suelo	571 mm	1 pie 10 pulg
Tipos y anchos de hoja:		
Universal	5,26 m	17 pies 3 pulg
Semiuniversal	4,86 m	15 pies 11 pulg
Capacidad Tanque de Combustible	1204 L	318 gal americanos

Fuente. Adaptado de Caterpillar Performance Handbook, Edition 37.

El tractor D10T se puede dividir en varios sistemas básicos:

- Chasis.
- Cabina del operador.
- Sistema de Refrigeración.
- Motor.
- Tren de Potencia; Convertidor de par, transmisión y mandos finales.

- Sistema de dirección y frenos.
- Sistema hidráulico de implementos.
- Sistema Eléctrico.
- Implementos; hoja topadora y desgarrador.

No nos extenderemos en la explicación profunda del funcionamiento de cada uno de los sistemas del tractor puesto que no es el objeto del presente texto. Sin embargo, sí se quiere explicar algunos conceptos básicos del motor, sistema de refrigeración, el tren de potencia y la localización de sus componentes en el tractor.

1.2.1 Motor

El D10T viene equipado con un motor diesel C27 con tecnología ACERT por sus siglas en inglés (Advance Combustion Emissions Reduction Technology) de 12 cilindros que entrega 580 hp. El motor tiene cuatro subsistemas; enfriamiento, admisión y escape, inyección de combustible y lubricación.

Figura 9. Motor C27 de un tractor D10T



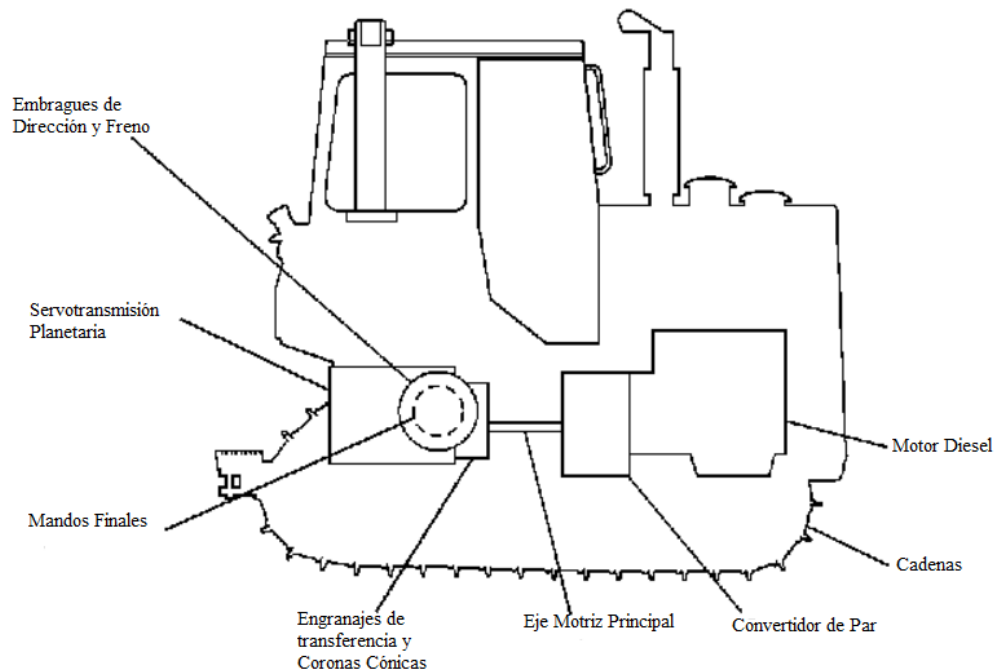
Fuente. Caterpillar, D10T Technical Sales Presentation.

1.2.2 Tren de Potencia

El tren de potencia está compuesto por los siguientes componentes principales; convertidor de par, eje motriz principal, transmisión, embragues de dirección y freno y mandos finales.

La potencia del motor diesel se envía a través del convertidor de par, el eje motriz principal, la transmisión planetaria, los engranajes de transferencia y coronas cónicas, los embragues de dirección y frenos y los mandos finales. A continuación, la potencia se transmite de los mandos finales a las cadenas.

Figura 10. Localización de componentes del tren de potencia.



Fuente. Caterpillar. System Operation D10T power train.

La transmisión planetaria tiene tres velocidades de avance y tres de retroceso. El ECM (Electronic Control Module) del tren de potencia controla electrónicamente la velocidad y dirección de la transmisión planetaria con entradas del operador. La potencia se dirige a la transmisión. A continuación, se transmite a los engranajes de transferencia y las coronas cónicas.

Los engranajes de transferencia y las coronas cónicas hacen girar dos semiejes interiores que transmiten la potencia a los embragues de dirección y frenos.

Los embragues de dirección hacen girar la máquina. Los frenos paran la máquina y, junto con los embragues de dirección, la hacen girar. El ECM del tren de potencia controla electrónicamente los embragues de dirección y frenos con entradas del operador.

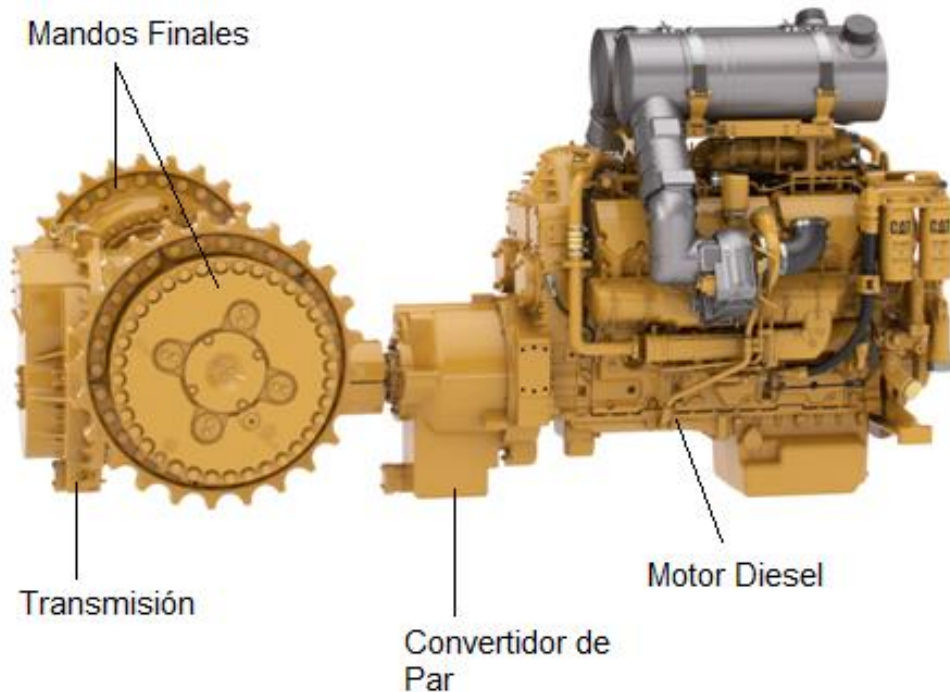
La potencia de los embragues de dirección y frenos se usa para hacer girar dos ejes de engranajes centrales que hacen girar los mandos finales. Los mandos

finales son juegos de engranajes planetarios de reducción sencilla que transmiten la potencia a las ruedas motrices.

Las ruedas motrices impulsan las cadenas que mueven la máquina.

El sistema de control electrónico del tren de fuerza (no se muestra), utiliza sensores para determinar la entrada del operador y la salida de los componentes.

Figura 11. Componentes principales del tren de potencia y motor D10T.



Fuente. Caterpillar, D10T Technical Sales Presentation.

A continuación, las señales de estos sensores se utilizan para controlar la máquina. El sistema muestra información del tren de fuerza en el panel de la pantalla en la cabina del operador.

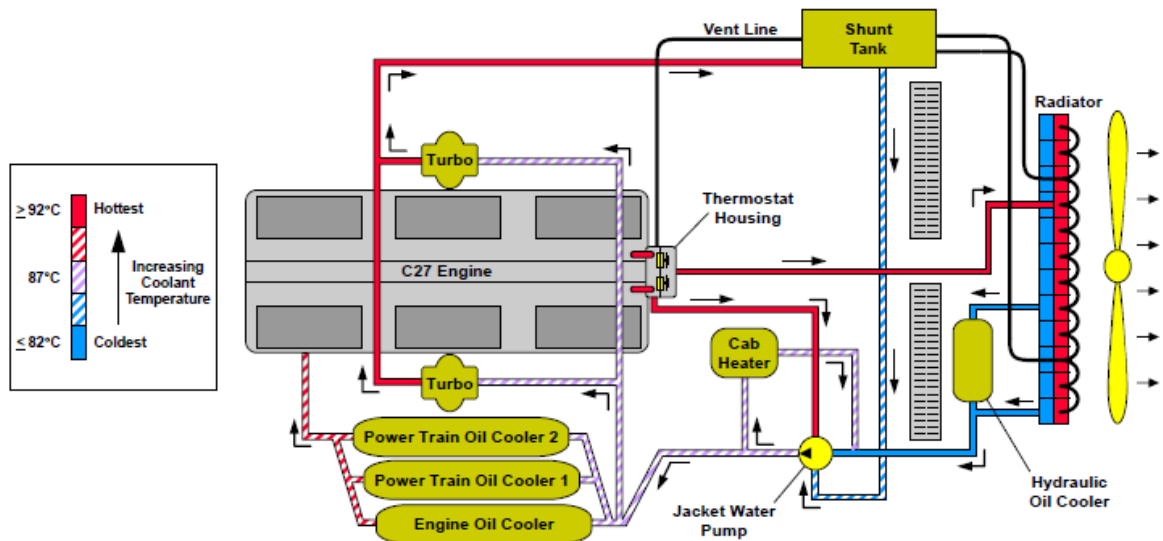
Los sensores detectan la posición de los controles y el estado de los componentes. Esta información se envía al ECM del tren de fuerza. El ECM del tren de fuerza envía corriente a las válvulas de control operadas por solenoide. Estas válvulas responden regulando la presión enviada a los embragues de transmisión y los frenos de servicio. Se muestra la información sobre selección de marchas, advertencias, códigos de servicio e información procedente de otros sistemas de la máquina. Esta información se muestra en la pantalla en la cabina del operador.

El ECM del tren de fuerza determina el embrague de la transmisión que se conecta. Esto viene determinado por el interruptor de cambios ascendentes/descendentes seleccionado y la posición del selector de cambios de marcha. El ECM del tren de fuerza utiliza los sensores de velocidad para medir la respuesta de la máquina. La modulación de presión para cada embrague es controlada para lograr una potencia continua. Esto proporciona al operador un cambio uniforme.

Para los frenos de servicio, el ECM del tren de fuerza responde a las señales del sensor de posición en el pedal del freno de servicio. A medida que el operador presiona el pedal del freno, el sistema de control electrónico ajusta rápidamente las presiones del freno correspondientes.

1.2.3 Sistema de Enfriamiento

Figura 12. Sistema de enfriamiento.



Fuente. Caterpillar Service Training D10T Track Type Tractor SERV1816.

En la figura 12 se muestra un esquema del sistema de refrigeración para el D10T tractor de cadenas.

El radiador del motor contiene doce núcleos. Estos núcleos son de "dos pasadas", de tal manera que el refrigerante entra por la parte inferior de los núcleos e igualmente sale por la parte inferior. El ventilador de demanda hidráulica está montado en frente del radiador y es controlado por el ECM del motor.

Esta disposición aspira aire de los lados y la parte superior del compartimiento del motor, a través de los núcleos del radiador, y lo expulsa por la parte delantera del tractor. Este diseño reduce la posibilidad de que el ventilador despidiera material sólido directamente sobre los núcleos bloqueándolos rápidamente.

El refrigerante fluye desde la bomba de agua hacia los enfriadores del tren de potencia y de aceite del motor y luego al bloque del motor. El refrigerante fluye entonces a través del bloque del motor y las culatas. Luego, el refrigerante fluye hacia los reguladores de temperatura (termostatos) y va directamente a la bomba de agua a través del tubo de derivación o al radiador, dependiendo de la temperatura del refrigerante. Si los termostatos están abiertos, el líquido refrigerante caliente entra en la parte inferior del radiador y fluye a través de la parte frontal de los núcleos y luego hacia abajo por la parte trasera de los núcleos.

El refrigerante sale del radiador por la parte inferior a través de dos puntos. Parte del refrigerante pasa a través del enfriador de aceite hidráulico y la otra parte del refrigerante va directamente a la bomba. Estos dos flujos se combinan después del enfriador de aceite hidráulico y regresan a la bomba de agua.

Una pequeña cantidad de líquido refrigerante fluye a los turbocompresores para enfriar los cojinetes y se dirige luego al tanque de derivación. El refrigerante del tanque de derivación se dirige a la bomba de agua.

Las líneas de ventilación permiten que el aire se escape del sistema de enfriamiento mientras el sistema se está llenando y durante el funcionamiento. Las líneas de ventilación también ayuda a drenar el sistema mediante la eliminación de cualquier vacío en el sistema causadas por el drenaje del mismo.

El tanque de derivación es un depósito que retiene la expansión de volumen de refrigerante a medida que el líquido refrigerante aumenta su temperatura. El nivel de líquido refrigerante en el depósito aumentará a medida que el refrigerante aumenta su temperatura. El nivel de refrigerante en el tanque de derivación bajará a medida que la temperatura del refrigerante disminuye.

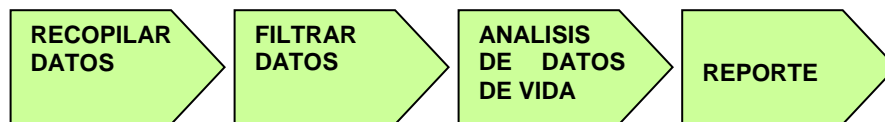
2. METODOLOGIA

En la figura 13 se muestra en forma gráfica los pasos a seguir para el desarrollo del análisis de vida de componentes para la definición de intervalos óptimos de reemplazo de componentes.

En el primer paso se recopilan los datos de dos fuentes principales: AMT; es el CMMS o software de mantenimiento que tiene consignada la información del proyecto y un programa paralelo en visual basic diseñado en el proyecto para llevar el histórico de intercambio de componentes. Esta información se exportará a Microsoft Excel para su manejo.

Se considerará el modelo D10T como el equipo a analizar y sus siguientes componentes: Radiador, Motor, Convertidor de Torque, Transmisión, Mandos Finales, Cilindros de Levante de Dozer, Cilindros de Inclinación de Dozer, Cilindros de levante de Ripper, Cilindros de Inclinación de Ripper. Estos componentes son los que mayor peso tienen en el costo por hora del equipo y en la tarifa final que se cobra al cliente.

Figura 13. Pasos a seguir para el análisis de ciclo de vida de componentes.



Fuente. Adaptado de mining.cat.com/bp

La población de D10T en Calenturitas es de 12 equipos con datos desde Abril de 2008 a Diciembre de 2013.

En el segundo paso se filtran los datos. Es posible que haya errores en la información histórica del proyecto que necesiten ser depurados para la consistencia de los procesos de análisis posteriores. Igualmente es necesario remover los reemplazos de componentes inferiores a 6.000 horas por considerarse fallas tempranas dentro del período de garantía de los componentes que por regla debieron ser reclamados al fabricante o reparador. Algunas de esas fallas tempranas, también son debidas a abusos del equipo o accidentes sobre los que el cliente asume responsabilidad.

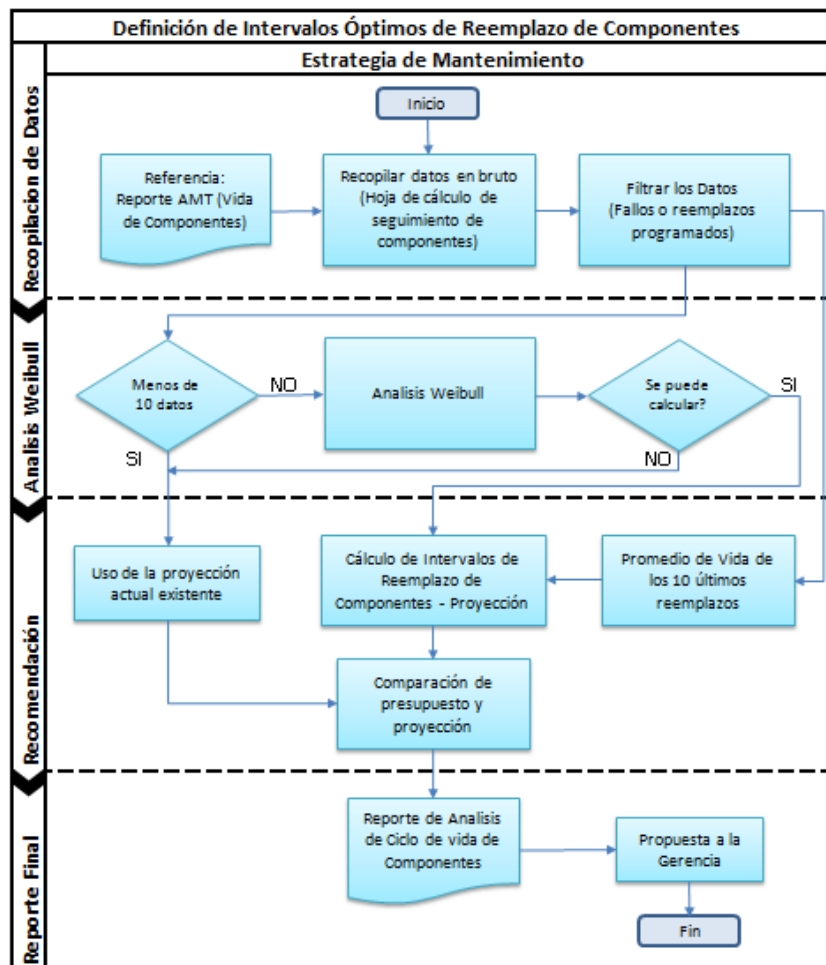
En el tercer paso se realiza el análisis de los datos ya filtrados y depurados. En estos datos se incluirán componentes fallados y reemplazados preventivamente por vida útil o por condición según el monitoreo de componentes como datos válidos. Para componentes con menos de 10 reemplazos históricos no se realizará análisis usando Weibull porque no se considera una cantidad de reemplazos

válida. Para estos componentes se conservará el intervalo teórico original del contrato. Para componentes con 10 o más reemplazos históricos se realizarán análisis usando el software Minitab 15 y Weibull para determinar el intervalo de reemplazo óptimo.

En el cuarto paso se realizará el reporte con la propuesta de modificación de intervalo de reemplazo según el análisis realizado en el paso anterior. Se espera que algunos componentes muestren haber tenido una vida más corta de la estimada inicialmente e igualmente habrá otros cuyo comportamiento haya sido superior; es decir, requieren menos reemplazos a los considerados al inicio del contrato.

En la figura 14 aparece un diagrama de flujo más detallado de los pasos a seguir para el desarrollo del trabajo.

Figura 14. Diagrama de flujo para la definición de intervalos óptimos de reemplazo de componentes.



Fuente. Adaptado de mining.cat.com/bp.

3. ANALISIS DE VIDA DE COMPONENTES USANDO WEIBULL

El equipo específico para el que se realiza este estudio es el tractor Caterpillar D10T. La población específica de equipos son los ubicados en la mina Calenturitas de propiedad de Prodeco en el Departamento de Cesar. Para esta población de equipos Prodeco y Gecolsa tienen un contrato de mantenimiento MARC en el que Gecolsa entrega horas de disponibilidad garantizada de equipos.

3.1 POBLACION DE TRACTORES D10T MINA CALENTURITAS

En la mina Calenturitas actualmente se encuentran en operación once tractores D10T. Todos estos equipos son propiedad de Prodeco. Gecolsa como distribuidor autorizado Caterpillar en Colombia tiene a su cargo el mantenimiento de estos equipos bajo contrato MARC (Maintenance and Repair Contract).

En la tabla 3 se muestra la población de equipos objeto del presente estudio, su fecha de inicio de operaciones y el horómetro de los equipos a 31 de Diciembre de 2013; fecha de corte para el análisis de la información.

Tabla 3. Población de Tractor D10T en la mina Calenturitas.

POBLACION TRACTORES D10T MINA CALENTURITAS					
Cantidad	Número Interno	Serie de Máquina	Fecha de Inicio	Fecha de Fin	Horometro 31Dic2013
1	T377	ORJG01474	18-abr-08	-	35198
2	T378	ORJG01476	25-abr-08	-	33225
3	T379	ORJG01575	09-jul-08	02-jul-12	25034
4	T380	ORJG01576	29-jun-08	-	32881
5	T381	ORJG01577	04-jul-08	-	32597
6	T391	ORJG02026	30-may-09	-	29254
7	T392	ORJG02027	01-jun-09	-	28390
8	T393	ORJG02464	11-feb-11	-	17970
9	T395	ORJG02432	02-feb-11	-	17773
10	T396	ORJG02433	23-ene-11	-	19183
11	T397	ORJG02434	05-feb-11	-	16610
12	T398	ORJG02438	19-ene-11	-	19624

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas

El tractor con número interno T379 es el único que está por fuera del contrato de los que aparecen en la tabla 3. Esto se debe a que este equipo fue sacado del

proyecto el 2 de Julio de 2012 con 25.034 horas de trabajo. Sin embargo los datos de reemplazo de componentes de ese equipo hasta esa fechas son valiosos y se tienen en cuenta para el análisis de vida de componentes.

3.2 RECOPIACION Y FILTRADO DE LA INFORMACION

Los componentes que se incluirán en el análisis de vida de componentes utilizando la distribución de Weibull son los siguientes:

1. Motor.
2. Convertidor de Par.
3. Transmisión.
4. Mandos finales. Izquierdo y Derecho tienen el mismo parte número, es decir son iguales.
5. Radiador.
6. Cilindros de levante de dozer. Izquierdo y Derecho tienen el mismo parte número, es decir son iguales.
7. Cilindros de inclinación de dozer. Tienen distinto parte número pero se pueden intercambiar.
8. Cilindros de levante de ripper. Izquierdo y Derecho tienen el mismo parte número, es decir son iguales.
9. Cilindros de inclinación de ripper. Izquierdo y Derecho tienen el mismo parte número, es decir son iguales.

Estos componentes se escogen por que son los de mayor impacto en la tarifa MARC, es decir son los que mayor costo por hora implican al mantenimiento de los equipos y por lo tanto tienen igualmente impacto en el balance de financiero del negocio para el distribuidor – Gecolsa.

La información histórica de reemplazo de los componentes ya mencionados para el modelo D10T se obtiene del software de mantenimiento AMT de i-Solutions licenciado para Gecolsa en Calenturitas y demás proyectos mineros.

Después de tener la información como la entrega el programa, es necesario filtrarla. Principalmente se busca filtrar reemplazos realizados cuando el componente tenía menos de 6000 horas por considerarse que fueron fallas tempranas reclamables por garantía a Caterpillar, en el caso de componentes nuevos, o al taller de reparación CRC – Gecolsa Barranquilla, cuando se trata de componentes reparados. Para el caso de los cilindros hidráulicos se filtran reemplazos realizados antes de 3.000 horas puesto que el cubrimiento de garantía de estos componentes termina en ese punto. Se filtran igualmente reemplazos debidos a daños generados al equipo por el cliente, usuario u operador. Algunos de estos casos corresponden a abuso de equipo, mala operación del mismo y

accidentes que terminaron causando algún daño al componente o a otro componente que pudo generar contaminación y la necesidad de reemplazar uno o varios componentes en el equipo.

La tabla 4 muestra un resumen de la información de reemplazo de componentes antes de ser filtrada mientras que la tabla 5 muestra el mismo resumen pero después que la información ha sido filtrada. Con la información ya filtrada se puede empezar a trabajar con datos considerados confiables para el análisis de vida de componentes. La información filtrada contiene entonces históricos de tres tipos datos de reemplazo de componentes:

- Componentes reemplazados por falla. Sacan al equipo de operación por fuera del tiempo programado. Las reparaciones de este tipo de fallas normalmente son costosas por daños contingentes. Adicionalmente el tiempo de reparación es mayor al estándar cuando el trabajo es programado.
- Componentes reemplazados por condición antes de falla. Sacan al equipo de operación por una condición anormal detectada en el monitoreo de condiciones del equipo pero antes de falla. Se puede considerar que se reemplaza en tiempo programado si la condición se detecta con suficiente antelación para programar la parada del equipo. Normalmente el tiempo de reparación es inferior comparado con el punto anterior.
- Componentes reemplazados por plan. Componentes que cumplieron con el horómetro mínimo determinado inicialmente en el LCC y se reemplazaron conforme a la planeación establecida en el momento programado y sin falla aparente.

Tabla 4. Resumen de datos de reemplazo de componentes antes de filtrado.

Tabla Resumen Datos Promedios Brutos Antes de Filtrado						
Componente	Ocurrencias	Primer Reemplazo	Ultimo Reemplazo	Vida Promedio	Proyección de Vida Útil	Diferencia
Motor	40	26/06/2009	28/11/2013	6634	12000	-5366
Convertidor	23	05/02/2010	28/11/2013	11200	12000	-800
Transmisión	27	04/03/2010	09/07/2013	9089	12000	-2911
Mando Final	52	10/10/2008	28/11/2013	8629	12000	-3371
Radiador	26	26/06/2010	24/09/2013	9400	12000	-2600
Cilindro Levante Dozer	59	12/08/2008	08/12/2013	8800	6000	2800
Cilindro Inclinación Dozer	43	16/12/2009	01/12/2013	10101	6000	4101
Cilindro Levante Ripper	18	23/03/2010	01/12/2013	13151	6000	7151
Cilindro Inclinación Ripper	13	26/01/2011	07/08/2013	16779	6000	10779

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Tabla 5. Resumen de datos de reemplazo de componentes ya filtrados.

Tabla Resumen Promedios Datos Filtrados						
Componente	Ocurrencias	Primer Reemplazo	Ultimo Reemplazo	Vida Promedio	Reemplazo por LCC	Diferencia
Motor	24	26/06/2009	28/11/2013	10085	12000	-1915
Convertidor	20	05/02/2010	28/11/2013	12642	12000	642
Transmisión	21	04/03/2010	09/07/2013	11868	12000	-132
Mando Final	31	01/08/2009	28/11/2013	11858	12000	-142
Radiador	18	26/06/2010	24/09/2013	11462	12000	-538
Cilindro Levante Dozer	46	18/01/2010	08/12/2013	10955	6000	4955
Cilindro Inclinación Dozer	34	16/12/2009	01/12/2013	12452	6000	6452
Cilindro Levante Ripper	16	23/03/2010	01/12/2013	15065	6000	9065
Cilindro Inclinación Ripper	11	26/01/2011	07/08/2013	19338	6000	13338

Fuente. El autor.

A continuación se desarrolla el análisis objeto de este documento componente por componente empezando con el motor, siguiendo por los componentes del tren de potencia, luego el radiador y por último los cilindros hidráulicos. Al abordar cada componente se incluirá la tabla de datos y los datos que fueron filtrados.

3.3 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE MOTOR

La tabla 6 muestra los datos válidos para reemplazo de motor con los que se realizará el análisis. La tabla 7 muestra los datos que fueron filtrados o removidos por considerarse no válidos por fallas prematuras reclamables por garantía o eventos del equipo.

Los datos de horómetro componente, que corresponden a las horas con que se removieron los componentes por falla, monitoreo de condiciones o por mantenimiento preventivo, se introducen en el software estadístico para su tratamiento y posterior análisis. En este caso se usó Minitab, arrojando las siguientes gráficas y resultados que se interpretarán para cada tipo de componente individualmente, empezando es esta sección con el motor.

Tabla 6. Detalle de los motores reemplazados. Datos válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T380	NO DA ENCENDIDO (TAPA VALVULA PUESTO # 7 ROTA)	26/06/2009	6.803	6.803
2	T377	PARTIO EJE DE BALANCIN	30/06/2009	8.114	8.114
3	T379	CAMBIO DE MOTOR DIESEL (RUIDO)	22/11/2009	8.992	8.992
4	T381	CAMBIO DE MOTOR DIESEL POR VIDA UTIL	22/02/2010	11.087	11.087
5	T378	CAMBIO DE MOTOR DIESEL	31/10/2010	14.775	13.441
6	T392	CAMBIO DE MOTOR (HUMO BLANCO POR EL MOTOR)	07/11/2010	9.357	9.357
7	T377	CAMBIO DE MOTOR POR RUIDO	18/01/2011	16.301	12.181
8	T380	RUIDO EXTRAÑO EN EL MOTOR	25/02/2011	17.705	10.902
9	T391	5D 1000.00.CC.00 ENGINE	20/05/2011	13.015	13.015
10	T377	CAMBIO MOTOR DIESEL POR HUMO BLANCO	21/04/2012	24.133	7.832
11	T379	CAMBIO DEL MOTOR	08/05/2012	24.907	12.194
12	T397	CAMBIO DEL MOTOR	16/05/2012	6.812	6.389
13	T381	CAMBIO DE MOTOR POR BAJA POTENCIA (10790 HR)	20/06/2012	24.325	10.781
14	T380	CAMBIO DE MOTOR (8461 HORAS)	03/07/2012	26.151	8.446
15	T391	CAMBIO DEL MOTOR DIESEL	11/11/2012	21.896	8.881
16	T378	CAMBIO DEL MOTOR DIESEL	25/12/2012	27.327	12.552
17	T393	CAMBIO DEL MOTOR	10/01/2013	11.601	11.601
18	T398	CAMBIO DEL MOTOR	03/02/2013	13.442	11.836
19	T392	CAMBIO DE MOTOR (8673 HORAS)	10/04/2013	23.787	8.661
20	T381	HUMO BLANCO/ CAMBIO DE MOTOR DIESEL 3151 HRS)	27/04/2013	29.302	6.366
21	T396	CAMBIO DEL MOTOR	05/06/2013	15.546	9.384
22	T395	CAMBIO DEL MOTOR	07/08/2013	15.145	13.120
23	T377	PASO DE ACEITE AL REFRIGERANTE/CAMBIO DE MOTOR DIESEL	24/09/2013	33.652	13.212
24	T391	CAMBIO DE MOTOR DIESEL - PUESTO 10 DESARMADO	28/11/2013	28.789	6.893

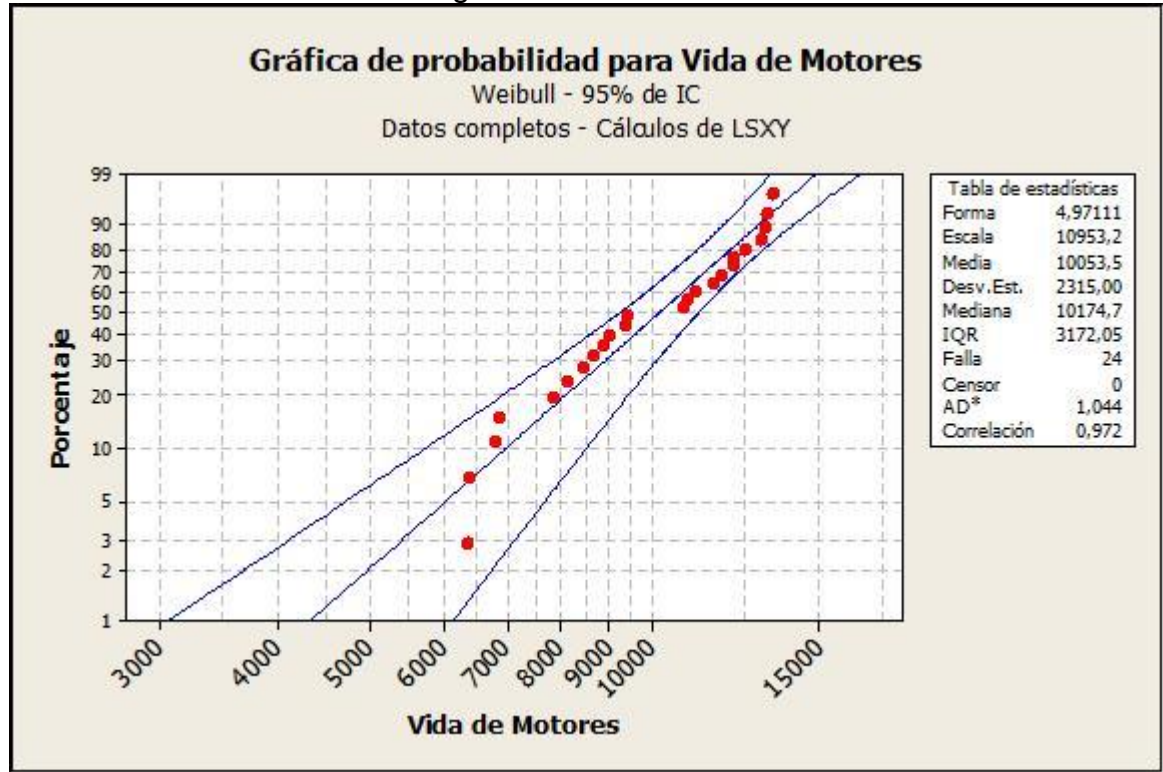
Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Tabla 7. Detalle de los motores reemplazados. Datos filtrados, no válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T378	CAMBIO DE MOTOR -EQUIPO ATOLLADO-	01/08/2009	8.137	8.137
2	T377	CAMBIO DE MOTOR POR RUIDO	10/05/2010	12.436	4.322
3	T379	CAMBIO DE MOTOR DIESEL	24/06/2010	12.713	3.721
4	T381	CAMBIO MOTOR DIESEL GOLPE CON ROCA PARTIO CARTER	26/06/2010	13.363	2.276
5	T381	CAMBIO DE MOTOR - COMPRESION AL RADIADOR	14/08/2010	13.544	181
6	T397	CAMBIO DE MOTOR	18/04/2011	423	423
7	T398	CAMBIO DE MOTOR	18/04/2011	1.606	1.606
8	T396	CAMBIO DE MOTOR POR EVENTO DE ATOLLAMIENTO	25/05/2011	2.382	2.382
9	T392	PARTIO EJE BOMBA DE TRANSFERENCIA - CAMBIO DE MOTOR	06/11/2011	15.126	5.769
10	T395	CAMBIO DE MOTOR POR DESGASTE PUESTO 9	09/01/2012	5.162	5.162
11	T396	CAMBIO DE MOTOR POR CONDICION	27/01/2012	6.162	3.780
12	T395	RUIDO EXTRAÑO EN EL MOTOR (CAMBIO DE MOTOR)	23/07/2012	8.371	3.209
13	T381	CAMBIO DE MOTOR	17/10/2012	26.157	1.832
14	T397	FUGA DE REFRIGERANTE/ CAMBIO DE MOTOR DIESEL	10/12/2012	10.538	3.726
15	T380	CAMBIO DE MOTOR	14/03/2013	29.434	3.283
16	T397	CAMBIO DEL MOTOR (CONATO)	29/03/2013	12.426	1.888

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Figura 15. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para motores D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

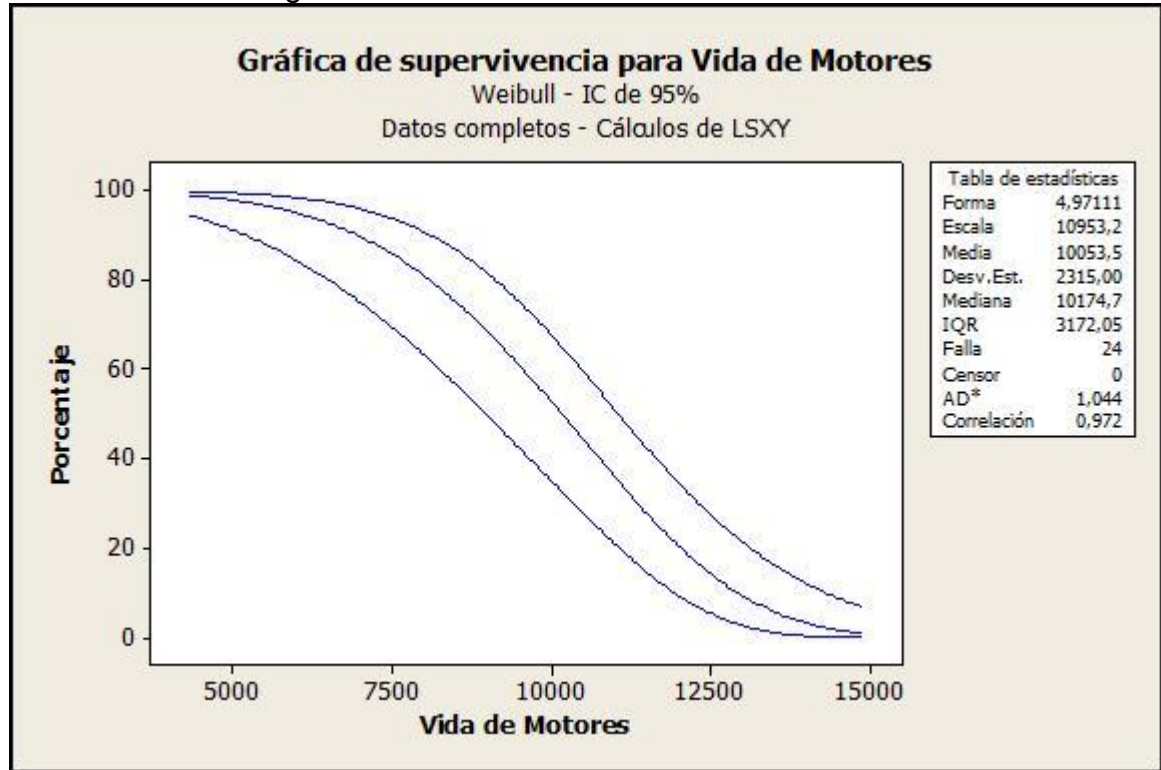
En la gráfica de la figura 15 cada punto identifica un evento de reemplazo de componente ya sea por falla, por condición o por que por las horas acumuladas se considera que ha llegado al final de su vida útil. En el eje Y se encuentra el porcentaje de probabilidad de falla para el componente específico de este caso – Motor. Según este gráfico componentes con 7.000 horas tienen solo el 10% de probabilidad de falla mientras que componentes con 13.000 horas tienen un 90% de probabilidad de falla.

El programa Minitab utilizado para realizar esta gráfica de probabilidad de Weibull también arroja los siguientes resultados:

Parámetro de Forma (β). En este caso igual a 4,97. Este valor nos ubica en la zona de fallas por desgaste en la curva de la bañera de la figura 1. Esto nos indica que los datos corresponden a componentes que se encontraban en fase de envejecimiento o desgaste.

Parámetro de Escala o característica de vida útil (η). En este caso igual a 10.953,2 horas. Este es el parámetro objetivo y más importante de este estudio. Indica el valor de vida útil de los motores D10T en Calenturitas.

Figura 16. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Motores D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

Este valor es inferior al establecido inicialmente por planeación que esta en 12.000 horas. Esta diferencia indica que la vida real de los motores está por debajo de lo estimado inicialmente en el LCC y está teniendo un impacto negativo en el balance financiero del proyecto. El costo por hora de cada motor de D10T calculado inicialmente, en la realidad es superior en un 8,7%.

Si los costos no fueran un factor determinante para este caso, sería adecuado reducir la proyección de reemplazo de motores para este modelo de 12.000 a 11.000 horas. Sin embargo, siendo los costos un factor determinante, se deben emprender acciones de mantenimiento predictivo tendientes a conseguir extender la vida útil de estos componentes.

Es necesario entonces hacer un estudio de los modos de falla de los motores para encontrar el que mayor impacto tiene sobre la vida útil de estos componentes y encaminar acciones tendientes a retrasar o evitar las fallas que determinan su remoción.

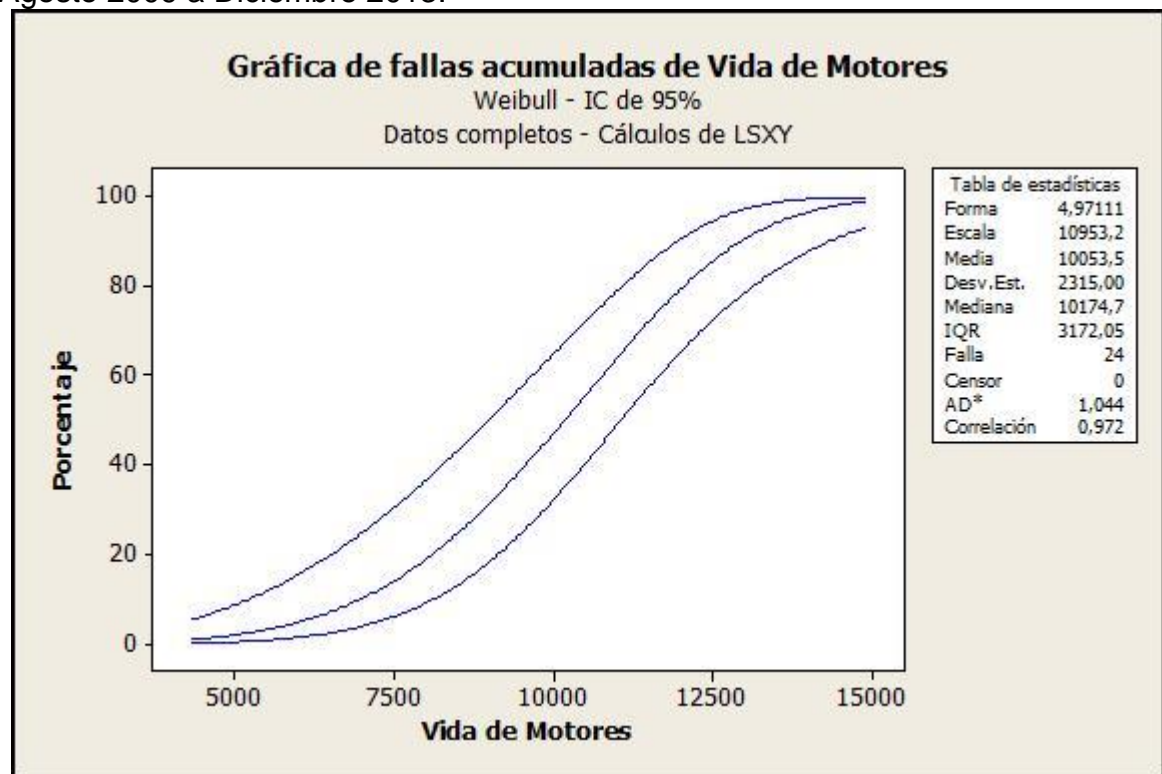
Correlación. En este caso 0,972. Debe estar entre 0,95 y 1 para indicar que los datos están correctamente alineados para Weibull, por lo tanto se cumple con esa prueba.

Media y Mediana. Estos valores no son utilizados en el presente ejercicio.

Desviación Estándar y Rango Intercuartil (IQR). Valores estadísticos que miden la dispersión de los datos. Sin embargo en el ejercicio actual no se tienen en cuenta puesto que los datos ya han sido filtrados y la dispersión de los mismos no se está considerando.

En la figura 16 se grafica la supervivencia o confiabilidad de los motores de tractores D10T de la mina Calenturitas en función de las horas acumuladas del componente. Se observa una confiabilidad del 98,8% para 4.500 horas. Cuando los componentes alcanzan las 7.500 horas, la confiabilidad se reduce al 85,8%. La supervivencia se reduce al 54,6% cuando los componentes alcanzan las 9.900 horas y solo el 16% de los motores superan las 12.300 horas. Un muy bajo porcentaje de motores (20%) alcanza y supera el objetivo establecido de 12.000 horas. Inversamente y como lo describe la gráfica de la figura 17, el 80% de los motores falla antes de 12.000 horas.

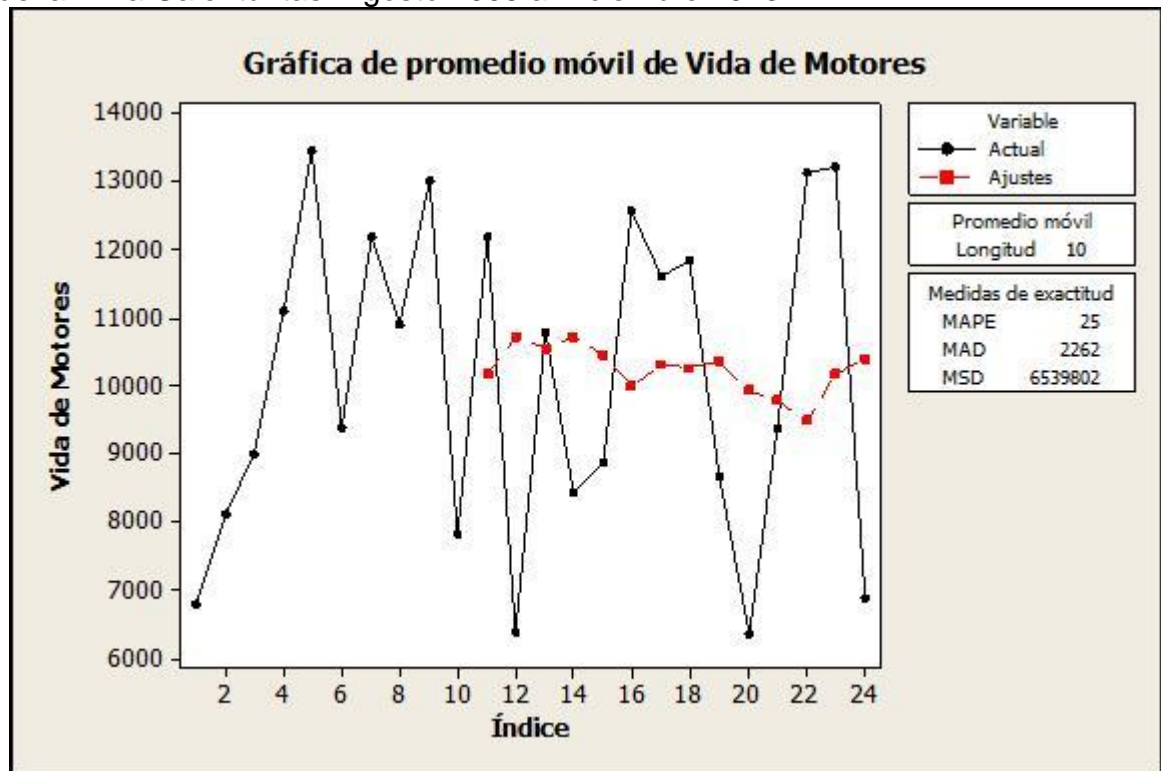
Figura 17. Gráfica de tasa de fallas de Motores D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

La figura 17 grafica la tasa de fallas de los motores según sus horas acumuladas. A medida que aumentan las horas de componente, aumenta la tasa de fallas. El patrón de la gráfica es característico de la fase III de la curva de la bañera donde los componentes fallan por desgaste o envejecimiento y concuerda con el parámetro de forma obtenido β de $4,97 > 1$.

Figura 18. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Motores D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

En la figura 18 se encuentra el promedio móvil de los últimos diez reemplazos. En esta gráfica se puede observar la tendencia de las horas con que se están reemplazando los motores. Se observa una tendencia de estabilidad. Esto significa que la frecuencia de reemplazo de motores en promedio ha permanecido estable en el tiempo y aunque presenta picos y valles en general las acciones que se han tomado hasta ahora en mantenimiento no han logrado incrementar significativamente la vida de estos componentes. La situación sin embargo tampoco está empeorando. El valor pico del promedio móvil esta en 10.711 horas y el valor valle en 9.489 horas. El último valor promedio es 10.406 horas; 547 horas por debajo del parámetro de escala obtenido con la aplicación de Weibull.

3.4 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE CONVERTIDOR

La tabla 8 muestra los datos válidos para reemplazo de convertidor de par con los que se realizará el análisis. La tabla 9 muestra los datos que fueron filtrados o removidos por considerarse no válidos por fallas prematuras reclamables por garantía o eventos del equipo.

Tabla 8. Detalle de los convertidores de par reemplazados. Datos válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T377	CAMBIO DE CONVERTIDOR X VIDA UTIL	05/02/2010	11.399	11.399
2	T379	3101.00.CC.00 TORQUE CONVERTER	06/06/2010	12.651	12.651
3	T381	3101.00.CC.00 TORQUE CONVERTER	26/06/2010	13.363	13.363
4	T378	3101.00.CC.00 TORQUE CONVERTER	31/10/2010	14.775	14.775
5	T392	3101.00.CC.00 TORQUE CONVERTER	07/11/2010	9.357	9.357
6	T380	3101.00.CC.00 TORQUE CONVERTER	12/12/2010	16.567	16.567
7	T391	5D 3101.00.CC.00 TORQUE CONVERTER	20/05/2011	13.015	13.015
8	T377	CAMBIO CONVERTIDOR	27/02/2012	23.233	11.834
9	T379	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	08/05/2012	24.907	12.256
10	T393	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	27/05/2012	7.711	7.711
11	T381	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	20/06/2012	24.325	10.963
12	T397	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	10/12/2012	10.538	10.538
13	T378	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	25/12/2012	27.327	12.552
14	T398	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	03/02/2013	13.442	13.442
15	T392	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	16/02/2013	23.227	13.870
16	T380	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	14/03/2013	29.434	12.867
17	T396	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	05/06/2013	15.546	15.546
18	T395	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	07/08/2013	15.145	15.145
19	T377	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	24/09/2013	33.652	10.419
20	T391	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	28/11/2013	28.789	14.577

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

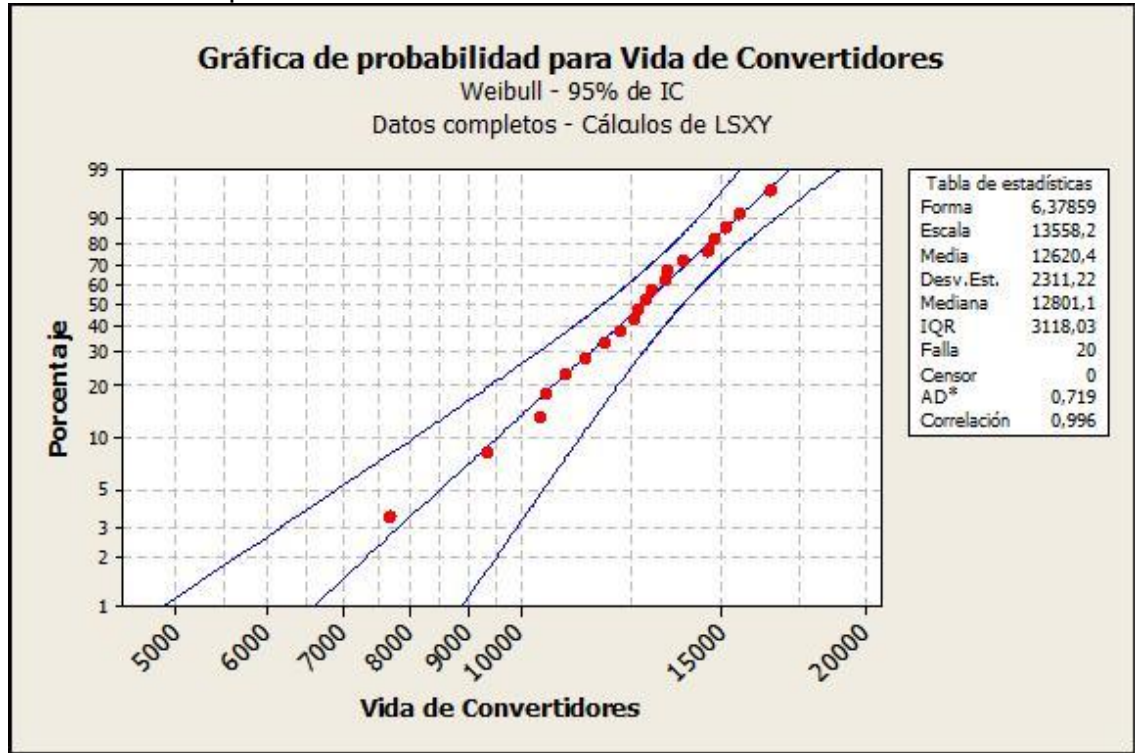
Tabla 9. Detalle de los convertidores de par reemplazados. Datos filtrados, no válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T391	CAMBIO DE CONVERTIDOR POR CONTAMINACION	30/07/2011	14.212	1.197
2	T393	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE	31/08/2012	9.379	1.668
3	T397	CAMBIO DEL CONVERTIDOR DE TORQUE (CONATO)	29/03/2013	12.426	1.888

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Los datos de horómetro componente; correspondientes a las horas con que fueron removidos los componentes por falla, monitoreo de condiciones o por mantenimiento preventivo, se introducen en el software estadístico Minitab para su tratamiento y posterior análisis, arrojando las siguientes gráficas y resultados.

Figura 19. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para convertidores de par D10T de la mina Calenturitas. Febrero 2010 - Diciembre 2013



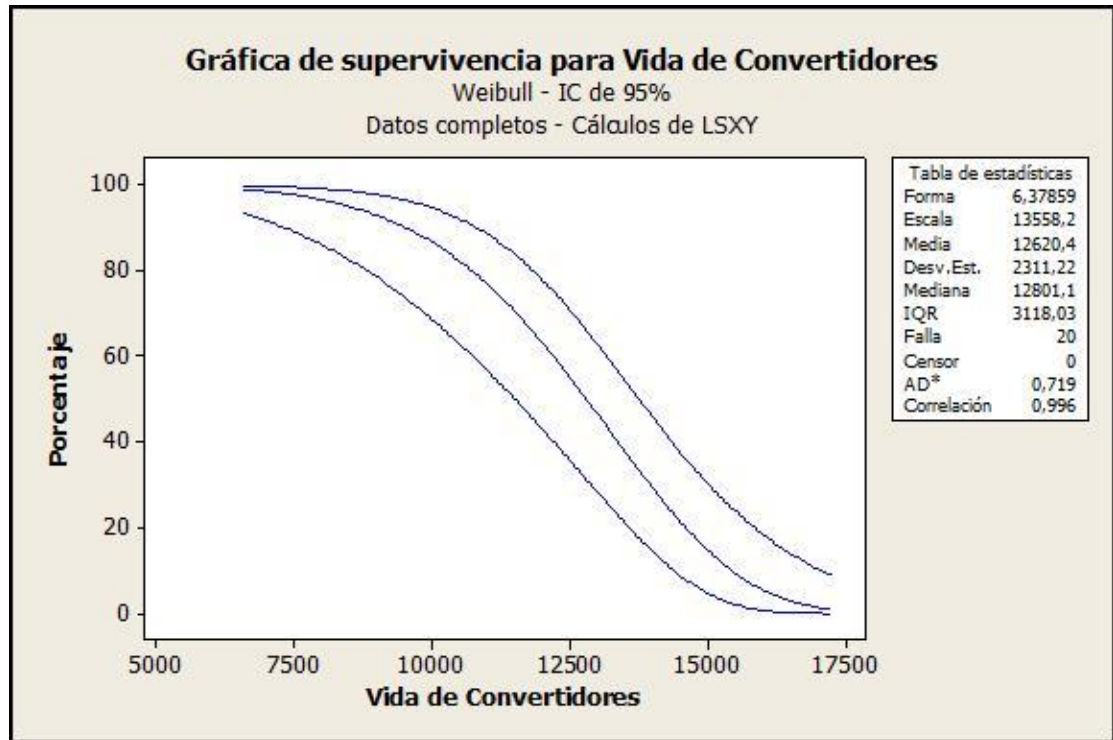
Fuente. El autor. Generada con Minitab.

En la gráfica de la figura 19 cada punto identifica un evento de reemplazo de componente ya sea por falla, por condición o por que por las horas acumuladas se considera que ha llegado al final de su vida útil. En el eje Y se encuentra el porcentaje de probabilidad de falla para el componente específico convertidor de par. Según este gráfico componentes con 9.500 horas tienen solo el 10% de probabilidad de falla mientras que componentes con 15.500 horas tienen un 90% de probabilidad de falla.

El programa Minitab utilizado para realizar esta gráfica de probabilidad de Weibull también arroja los siguientes resultados:

Parámetro de Forma (β). En este caso igual a 6,37. Este valor nos ubica en la zona de fallas por desgaste en la curva de la bañera. Esto nos indica que los datos corresponden a componentes que se encontraban en fase de envejecimiento o desgaste.

Figura 20. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Convertidores de Par D10T de la mina Calenturitas. Febrero 2010 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

Parámetro de Escala o característica de vida útil (η). En este caso igual a 13.558,2 horas. Este es el parámetro objetivo y más importante de este estudio. Indica el valor real de vida útil de los convertidores de par D10T en Calenturitas.

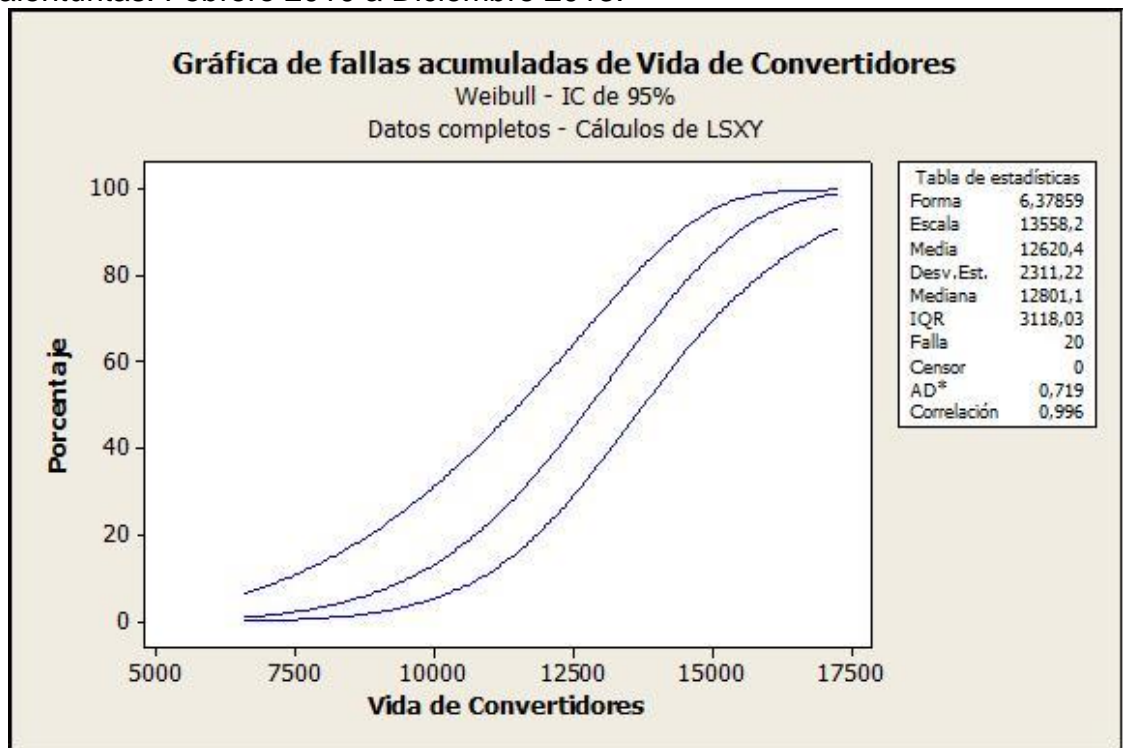
Este valor es superior al establecido inicialmente por planeación que esta en 12.000 horas. Esta diferencia indica que la vida real de los convertidores de par está por encima de lo estimado inicialmente en el LCC y está teniendo un impacto positivo en el balance financiero del proyecto. El costo por hora de cada convertidor de D10T calculado inicialmente es en realidad inferior en un 12,9%.

En este caso es adecuado modificar la proyección de reemplazo de convertidores de par para este modelo de 12.000 a 13.500 horas. Este cambio se podría realizar sin ninguna modificación al programa de mantenimiento planteado para este componente.

Correlación. En este caso 0,996. Debe estar entre 0,95 y 1 para indicar que los datos están correctamente alineados para Weibull, por lo tanto se cumple con esa prueba.

En la figura 20 se grafica la supervivencia o confiabilidad de los convertidores de par de tractores D10T de la mina Calenturitas en función de las horas acumuladas del componente. Se observa una confiabilidad del 98,9% para 6.600 horas. Cuando los componentes alcanzan las 10.200 horas, la confiabilidad se reduce solo al 84,9%. La supervivencia se reduce al 53,4% cuando los componentes alcanzan las 12.600 horas y el 14,8% de los convertidores superan las 15.000 horas. La confiabilidad de este componente cuando llega al horómetro objetivo de 12.000 horas es aún del 63,1%.

Figura 21. Gráfica de tasa de fallas de Convertidores de Par D10T de la mina Calenturitas. Febrero 2010 a Diciembre 2013.



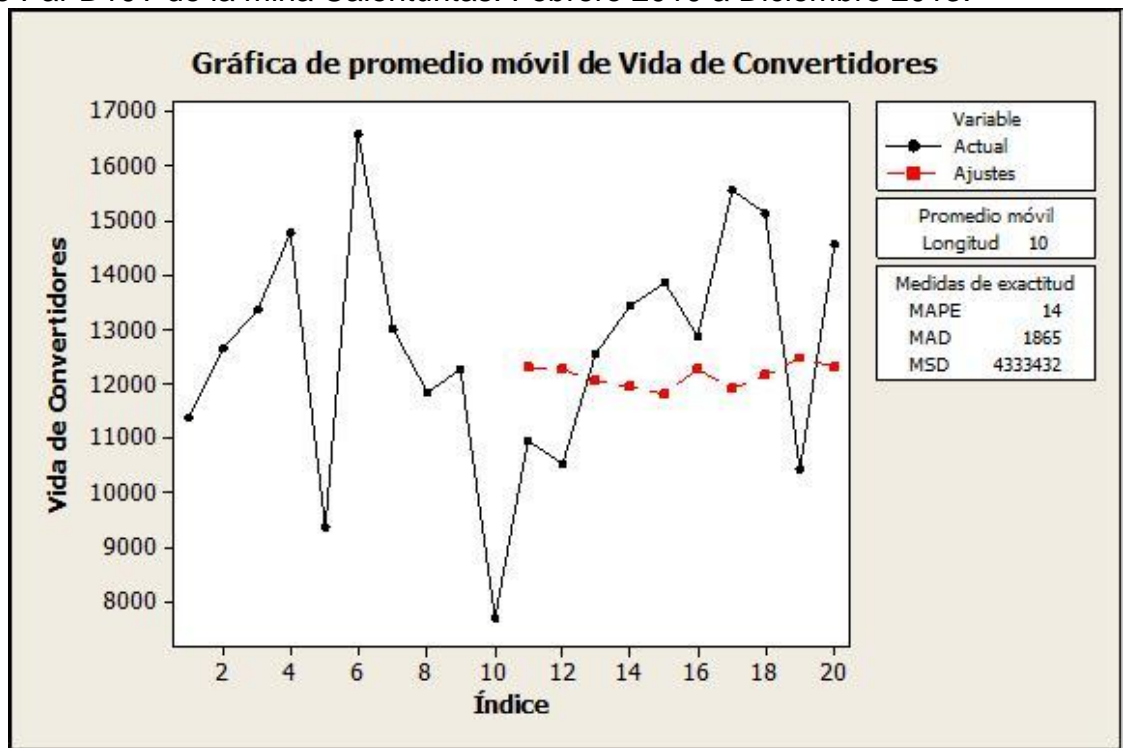
Fuente. El autor. Generada con Minitab.

La figura 21 grafica la tasa de fallas de los convertidores de par según sus horas acumuladas. A medida que aumentan las horas de componente, aumenta la tasa de fallas. El patrón de la gráfica es característico de la fase III de la curva de la bañera donde los componentes fallan por desgaste o envejecimiento y concuerda con el parámetro de forma obtenido β de $6,37 > 1$.

En la figura 22 se encuentra el promedio móvil de los últimos diez reemplazos. En esta gráfica se puede observar la tendencia de las horas con que se están reemplazando los convertidores. Se observa una tendencia de estabilidad. Esto

significa que la frecuencia de reemplazo de convertidores en promedio ha permanecido estable en el tiempo y aunque presenta picos y valles en general las acciones que se han tomado hasta ahora en mantenimiento no han variado significativamente la vida de estos componentes. La situación sin embargo tampoco está empeorando. El valor pico del promedio móvil esta en 12.489 horas y el valor valle en 11.823 horas. El último valor promedio es 12.305 horas; 305 horas por encima del valor objetivo y 1.253 horas por debajo del parámetro de escala obtenido con la aplicación de Weibull.

Figura 22. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Convertidores de Par D10T de la mina Calenturitas. Febrero 2010 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

3.5 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE LA TRANSMISIÓN

La tabla 10 muestra los datos válidos para reemplazo de transmisión con los que se realizará el análisis. La tabla 11 muestra los datos que fueron filtrados o removidos por considerarse no válidos por fallas prematuras reclamables por garantía o eventos del equipo.

Tabla 10. Detalle de las transmisiones reemplazadas. Datos válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T380	CAMBIO DE TRANSMISION	04/03/2010	11.400	11.400
2	T377	3030.00.CC.00 TRANSMISION	24/04/2010	12.381	12.381
3	T379	3030.00.CC.00 TRANSMISION	06/06/2010	12.651	12.651
4	T381	3030.00.CC.00 TRANSMISION	14/08/2010	13.544	13.544
5	T378	3030.00.CC.00 TRANSMISION	04/01/2011	15.663	15.663
6	T391	5D 3030.00.CC.00 TRANSMISION	20/05/2011	13.015	13.015
7	T392	CAMBIO DE TRANSMISION	07/08/2011	13.599	13.599
8	T377	EQUIPO SE NEUTRALIZA CUANDO ACELERA	17/03/2012	23.541	11.160
9	T379	CAMBIO DE LA TRANSMISION	08/05/2012	24.907	12.256
10	T393	CAMBIO DE LA TRANSMISION POR DESLIZAMIENTO	12/05/2012	7.489	7.492
11	T380	CAMBIO DE LA TRANSMISION	03/07/2012	26.151	14.751
12	T377	CAMBIO DE TRANSMISION	15/08/2012	26.012	6.471
13	T397	CAMBIO DE LA TRANSMISION	25/08/2012	8.628	8.628
14	T395	NEUTRALIZADO/ EMBRAGUE #5 DE XMNS FUGA	03/09/2012	9.069	9.069
15	T393	CAMBIO DE TRASMSION	30/10/2012	10.419	15.202
16	T378	CAMBIO DE LA TRANSMISION	25/12/2012	27.327	11.665
17	T398	CAMBIO DE LA TRANSMISION	03/02/2013	13.442	13.442
18	T392	CAMBIO DE LA TRANSMISION	16/02/2013	23.227	9.628
19	T381	CAMBIO DE LA TRANSMISION	27/04/2013	29.302	13.661
20	T396	CAMBIO DE LA TRANSMISION	05/06/2013	15.546	11.541
21	T391	CAMBIO DE LA TRANSMISION	09/07/2013	26.223	12.011

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

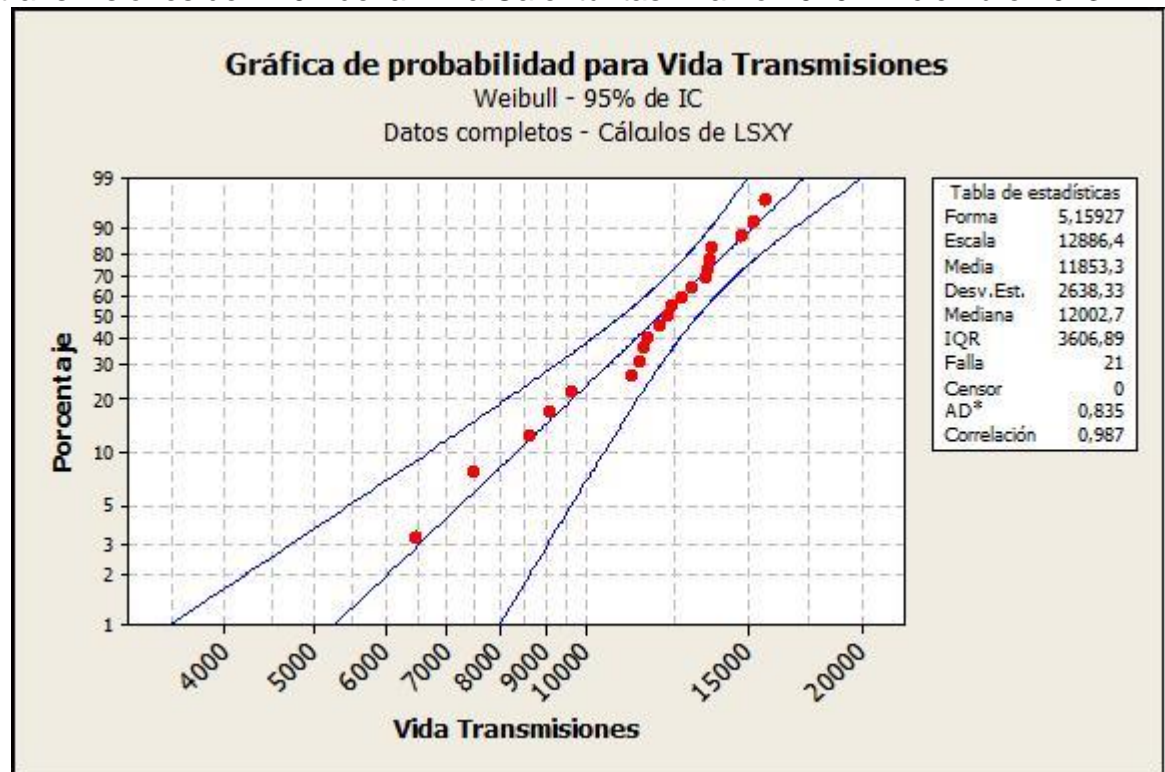
Tabla 11. Detalle de las transmisiones reemplazadas. Datos filtrados, no válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T381	CAMBIO DE TRANSMISION (ALTA TEMPERATURA)	16/12/2010	15.641	2.098
2	T396	NO MODULA (CAMBIO DE TRASMSION)	23/01/2011	9	9
3	T393	3030.00.CC.00 TRANSMISION	10/03/2011	27	27
4	T391	DESMONTE DE XMSN POR CONTAMINACION	30/07/2011	14.212	1.197
5	T396	CAMBIO DE TRANSMISION	25/09/2011	4.005	3.997
6	T395	CAMBIO DE TRANSMISION	17/06/2013	14.213	5.144

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Los datos de horómetro componente correspondientes a las horas con que fueron removidas las transmisiones por falla, monitoreo de condiciones o por mantenimiento preventivo, se introducen en el Minitab, arrojando las siguientes gráficas y resultados.

Figura 23. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para transmisiones de D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 - Diciembre 2013



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

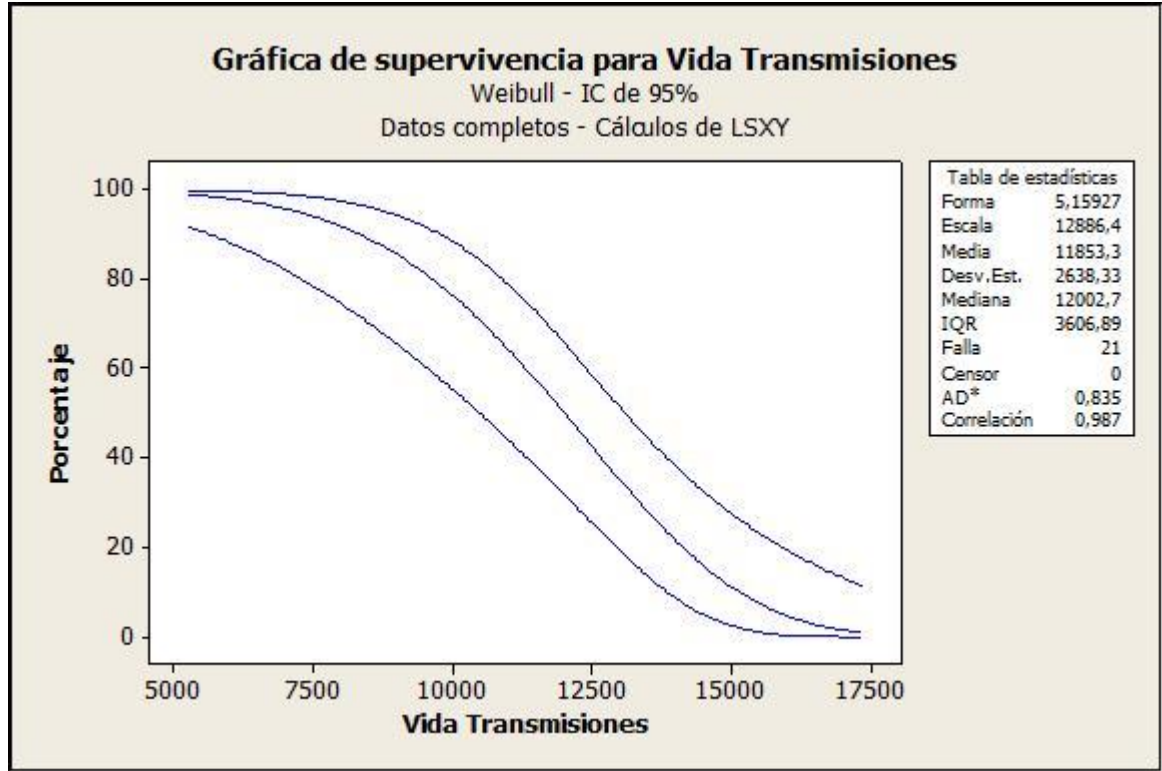
En la gráfica de la figura 23 cada punto identifica un evento de reemplazo de componente ya sea por falla, por condición o por que por las horas acumuladas se considera que ha llegado al final de su vida útil. En el eje Y se encuentra el porcentaje de probabilidad de falla para el componente específico transmisión. Según este gráfico transmisiones con 8.300 horas tienen una probabilidad de falla del 10% mientras que cuando alcanzan las 15.000 horas tienen un 90% de probabilidad de falla.

El programa Minitab utilizado para realizar esta gráfica de probabilidad de Weibull también arroja los siguientes resultados:

Parámetro de Forma (β). En este caso igual a 5,15. Este valor nos ubica en la zona de fallas por desgaste en la curva de la bañera de la figura 1. Esto nos indica

que los datos corresponden a componentes que se encontraban en fase de envejecimiento o desgaste.

Figura 24. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Transmisiones D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

Parámetro de Escala o característica de vida útil (η). En este caso igual a 12.886,4 horas. Este es el parámetro objetivo y más importante de este estudio. Indica el valor real de vida útil de las transmisiones de D10T en Calenturitas.

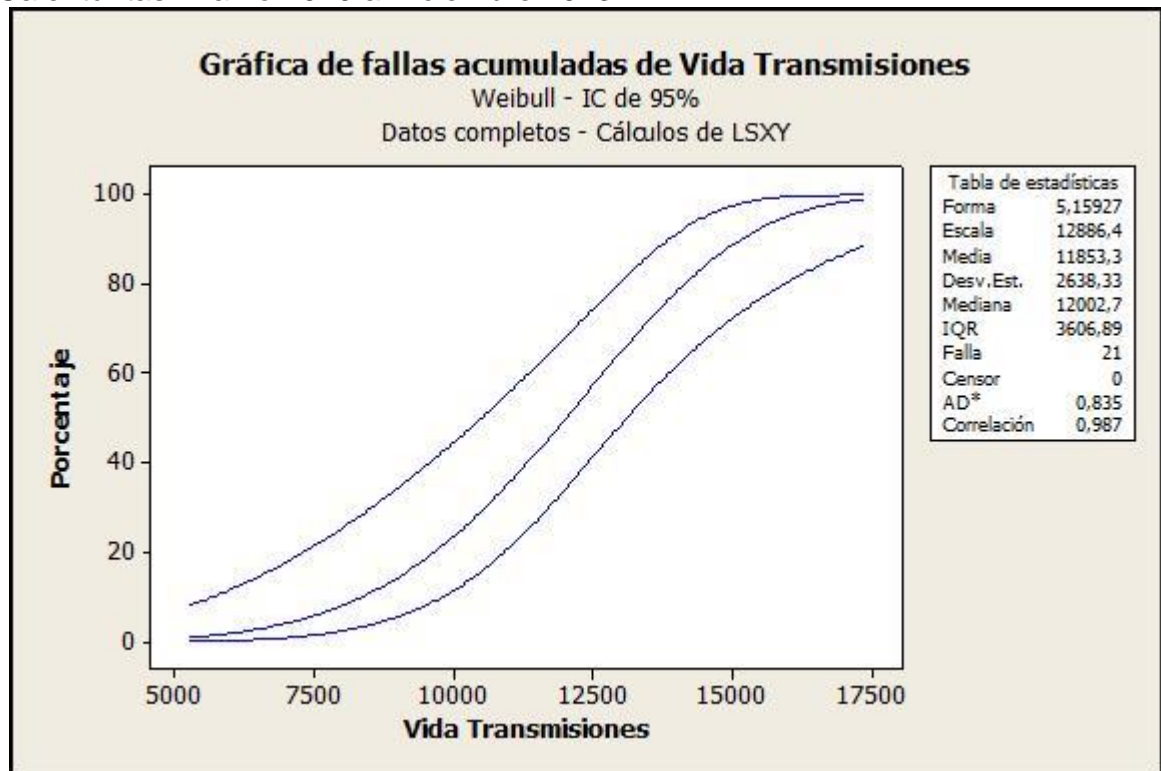
Este valor es superior al establecido inicialmente por planeación que esta en 12.000 horas. Esta diferencia indica que la vida real de las transmisiones está por encima de lo estimado inicialmente en el LCC y está teniendo un impacto positivo en el balance financiero del proyecto. El costo por hora de cada transmisión de D10T calculado inicialmente es en realidad inferior en un 7,3%.

En este caso es adecuado modificar la proyección de reemplazo de transmisiones para este modelo de 12.000 a 13.000 horas. Este cambio se podría realizar sin ninguna modificación al programa de mantenimiento planteado para este componente.

Correlación. En este caso 0,987. Debe estar entre 0,95 y 1 para indicar que los datos están correctamente alineados para Weibull, por lo tanto se cumple con esa prueba.

En la figura 24 se grafica la supervivencia o confiabilidad de las transmisiones de tractores D10T de la mina Calenturitas en función de las horas acumuladas del componente. Se observa una confiabilidad del 98,7% para 5.500 horas. Cuando los componentes alcanzan las 9.160 horas, la confiabilidad se reduce al 84,2%. La supervivencia se reduce al 55,9% cuando los componentes alcanzan las 11.600 horas y solo el 21% de las transmisiones superan las 14.000 horas. La confiabilidad de este componente cuando llega al horómetro objetivo de 12.000 horas es aún del 50%.

Figura 25. Gráfica de tasa de fallas de transmisiones D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 a Diciembre 2013.

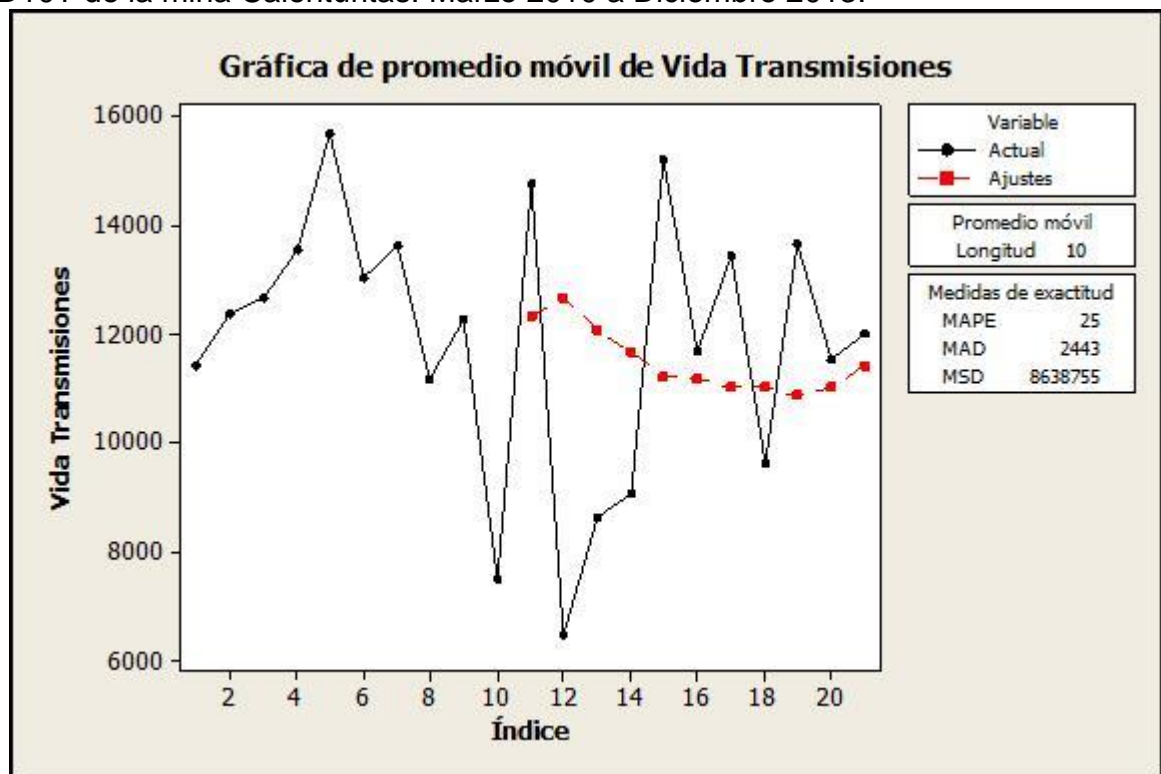


Fuente. El autor. Generada con Minitab.

La figura 25, grafica la tasa de fallas de las transmisiones según sus horas acumuladas. A medida que aumentan las horas de componente, aumenta la tasa de fallas. El patrón de la gráfica es característico de la fase III de la curva de la bañera donde los componentes fallan por desgaste o envejecimiento y concuerda con el parámetro de forma obtenido β de $5,15 > 1$.

En la figura 26 se encuentra el promedio móvil de los últimos diez reemplazos. En esta gráfica se puede observar la tendencia de las horas con que se están reemplazando los convertidores. Se observa una tendencia negativa. Esto significa que la frecuencia de reemplazo de las transmisiones en promedio se viene reduciendo. Los últimos dos promedios muestran una recuperación que es necesario mantener. El valor pico del promedio móvil esta en 12.651 horas y el valor valle en 10.860 horas. El último valor promedio es 11.405 horas; 595 horas por debajo del valor objetivo y 1.481 horas por debajo del parámetro de escala obtenido con la aplicación de Weibull.

Figura 26. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Transmisiones D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

3.6 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE MANDOS FINALES

La tabla 12 muestra los datos válidos para reemplazo de mandos finales con los que se realizará el análisis. La tabla 13 muestra los datos que fueron filtrados o removidos por considerarse no válidos por fallas prematuras reclamables por garantía o eventos del equipo.

Tabla 12. Detalle de los mandos finales reemplazados. Datos válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T378	4051.LH.CC.00 FINAL DRIVE / WHEEL	01/08/2009	8.137	8.137
2	T378	4051.RH.CC.00 FINAL DRIVE / WHEEL	01/08/2009	8.137	8.137
3	T380	CAMBIO DE MANDO FINAL RH	28/01/2010	11.086	11.086
4	T380	CAMBIO DE MANDO FINAL LH	28/01/2010	11.086	11.086
5	T377	4051.LH.CC.00 FINAL DRIVE / WHEEL	24/04/2010	12.381	8.972
6	T377	4051.RH.CC.00 FINAL DRIVE / WHEEL	24/04/2010	12.381	8.972
7	T381	4051.LH.CC.00 FINAL DRIVE / WHEEL	26/06/2010	13.363	14.629
8	T378	CAMBIO DE MANDO FINAL RH- PROBLEMAS GIRO IZQUIERDA	13/10/2010	14.429	6.291
9	T392	CAMBIO DE MANDO FINAL RH (VIDA UTIL)	27/04/2011	12.169	12.169
10	T392	FUGA POR SELLO DUOCONE MANDO FINAL LH	27/04/2011	12.169	12.169
11	T381	4051.RH.CC.00 FINAL DRIVE / WHEEL	19/06/2011	18.611	11.744
12	T379	MANDO FINAL RH CON FUGA CRITICA	26/07/2011	19.601	10.198
13	T391	CAMBIO DE MANDO FINAL LH POR CONTAMINACION	30/07/2011	14.212	6.411
14	T391	CAMBIO DE MANDO FINAL RH POR CONTAMINACION	30/07/2011	14.212	7.493
15	T378	CAMBIO DE MANDO FINAL LH POR VIDA ÚTIL	06/01/2012	21.499	13.362
16	T379	CAMBIO DE MANDO FINAL LH POR VIDA UTIL	10/04/2012	24.434	15.031
17	T380	CAMBIO DEL MANDO FINAL DERECHO	19/04/2012	24.979	13.579
18	T380	CAMBIO DE MANDO FINAL LH (FUGA SELLO DUO CONE)	04/06/2012	25.716	14.316
19	T377	CAMBIO DEL MANDO FINAL DERECHO	15/08/2012	26.012	13.631
20	T377	CAMBIO DEL MANDO FINAL IZQUIERDO	15/08/2012	26.012	13.631
21	T393	CAMBIO DEL MANDO FINAL DERECHO	21/11/2012	10.703	10.703
22	T396	CAMBIO DEL MANDO FINAL IZQUIERDO	19/02/2013	13.589	13.589
23	T396	CAMBIO DEL MANDO FINAL DERECHO	19/02/2013	13.589	13.589
24	T397	CAMBIO DEL MANDO FINAL IZQUIERDO	20/02/2013	11.792	11.792
25	T397	CAMBIO DEL MANDO FINAL DERECHO	20/02/2013	11.792	11.792
26	T381	CAMBIO DEL MANDO FINAL IZQUIERDO	27/04/2013	29.302	13.677
27	T381	MANDO FINAL RH FRENADO	29/06/2013	30.316	11.705
28	T395	CAMBIO DEL MANDO FINAL DERECHO	07/08/2013	15.145	15.145
29	T392	CAMBIO DEL MANDO FINAL LH	22/10/2013	27.163	14.994
30	T392	CAMBIO DEL MANDO FINAL DERECHO	22/10/2013	27.163	14.994
31	T391	CAMBIO DEL MANDO FINAL IZQUIERDO	28/11/2013	28.789	14.577

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Tabla 13. Detalle de los mandos finales reemplazadas. Datos filtrados, no válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T377	CAMBIO DE MANDO FINAL LH - MOD FCA	10/10/2008	3.409	3.409
2	T377	CAMBIO DE MANDOS FINALES - MOD. FCA	10/10/2008	3.409	3.409
3	T381	CAMBIO DE MANDO FINAL LH	05/11/2008	2.143	2.143
4	T381	CAMBIAR MANDO FINAL DERECHO.	08/01/2009	3.303	3.303
5	T381	CAMBIO DE MANDO FINAL RH	15/07/2009	6.866	3.563
6	T379	CAMBIAR MANDO FINAL LH POR MODIFICACION DE FABRICA	16/12/2009	9.403	9.403
7	T379	CAMBIAR MANDO FINAL RH POR MODIFICACION DE FABRICA	16/12/2009	9.403	9.403
8	T380	CAMBIO DE MANDO FINAL LH	04/03/2010	11.400	314
9	T380	CAMBIO DE MANDO FINAL RH	04/03/2010	11.400	314
10	T391	CAMBIAR MANDO FINAL LH POR MODIFICACION DE FABRICA	26/05/2010	6.719	6.719
11	T391	CAMBIAR MANDO FINAL RH POR MODIFICACION DE FABRICA	26/05/2010	6.719	6.719
12	T391	CAMBIO DE MANDO FINAL LH	02/08/2010	7.801	1.082
13	T381	4051.LH.CC.00 FINAL DRIVE / WHEEL	16/02/2011	16.704	3.341
14	T378	CAMBIO DE MANDO FINAL RH	26/02/2011	16.438	2.009
15	T398	CAMBIO DE MANDO FINAL LH POR CONDICION	24/09/2011	4.158	4.158
16	T398	CAMBIO DE MANDO FINAL RH POR CONDICION	24/09/2011	4.158	4.158
17	T393	4051.LH.CC.00 FINAL DRIVE / WHEEL	13/12/2011	4.885	4.885
18	T393	FUGA MANDO FINAL LH POR SELLO DUO CONE	13/01/2012	5.428	543
19	T378	FUGA POR MANDO FINAL RH	19/02/2012	22.210	5.772
20	T395	CAMBIO DE MANDO FINAL LH POR CONDICION	24/02/2012	5.727	5.727
21	T393	CAMBIO DE MANDO FINAL LH	18/11/2012	10.668	5.240

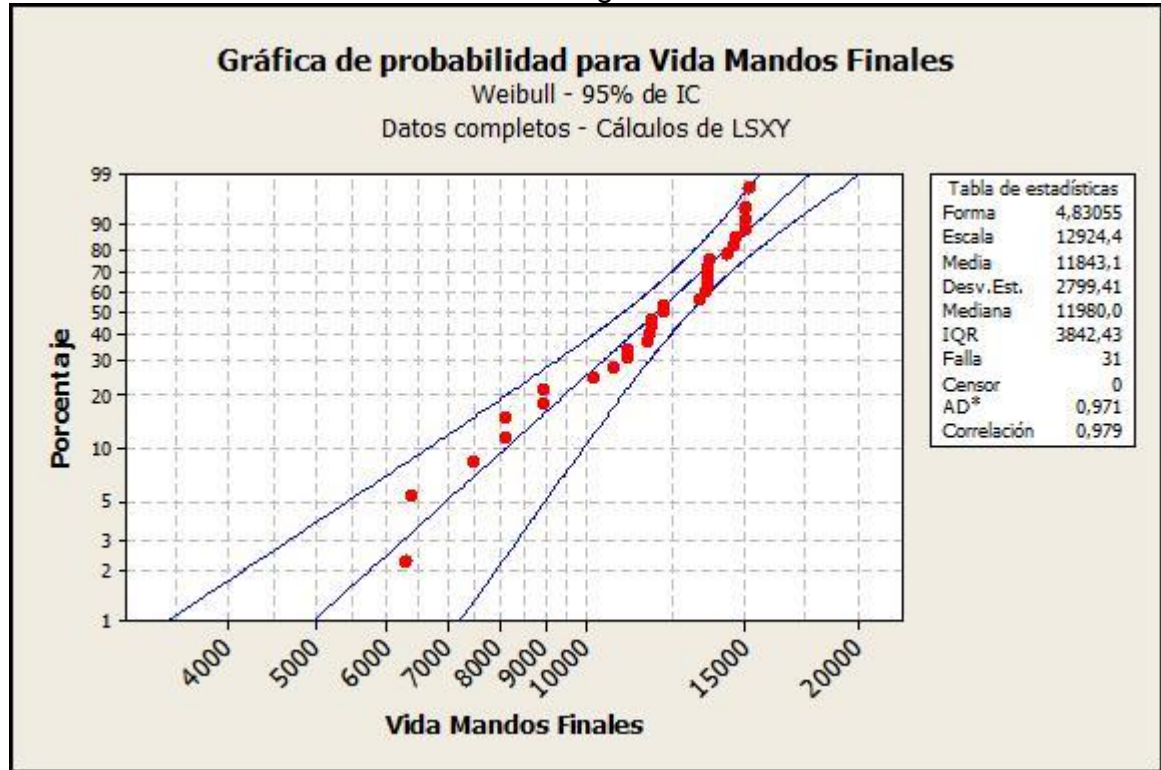
Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Los datos de horómetro componente; horas con que fueron removidos los componentes por falla, monitoreo de condiciones o por mantenimiento preventivo, se introducen en el software estadístico Minitab para su tratamiento y posterior análisis, arrojando las siguientes gráficas y resultados.

En la gráfica de la figura 27 cada punto identifica un evento de reemplazo de componente ya sea por falla, por condición o por que por las horas acumuladas se considera que ha llegado al final de su vida útil. En el eje Y se encuentra el porcentaje de probabilidad de falla para el componente específico mando final. Según este gráfico componentes con 8.100 horas tienen solo el 10% de probabilidad de falla mientras que componentes con 15.400 horas tienen un 90% de probabilidad de falla.

El programa Minitab utilizado para realizar esta gráfica de probabilidad de Weibull también arroja los siguientes resultados:

Figura 27. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para mandos finales de D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 - Diciembre 2013



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

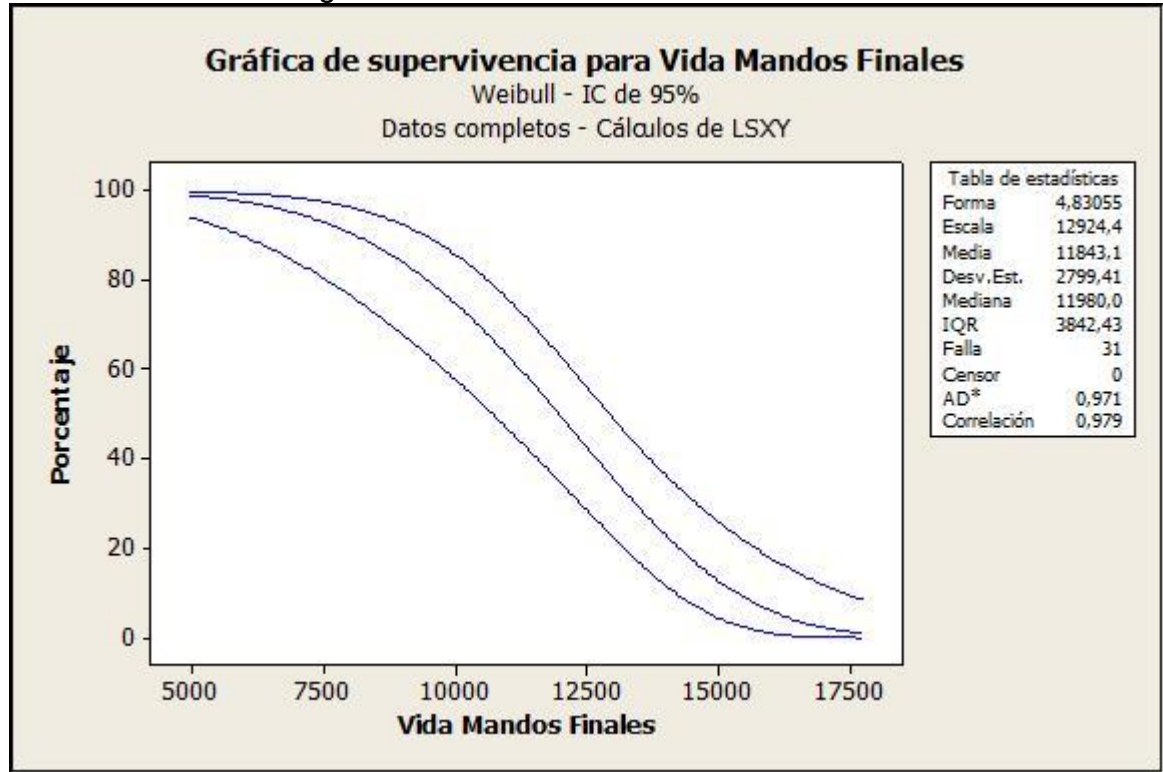
Parámetro de Forma (β). En este caso igual a 4,83. Este valor nos ubica en la zona de fallas por desgaste en la curva de la bañera de la figura 1. Esto nos indica que los datos corresponden a componentes que se encontraban en fase de envejecimiento o desgaste.

Parámetro de Escala o característica de vida útil (η). En este caso igual a 12.924,4 horas. Este es el parámetro objetivo y más importante de este estudio. Indica el valor real de vida útil de los mandos finales de D10T en Calenturitas.

Este valor es superior al establecido inicialmente por planeación que esta en 12.000 horas. Esta diferencia indica que la vida real de los mandos finales está por encima de lo estimado inicialmente en el LCC y está teniendo un impacto positivo en el balance financiero del proyecto. El costo por hora de cada mando final de D10T calculado inicialmente es en realidad inferior en un 7,7%.

En este caso es adecuado modificar la proyección de reemplazo de mandos finales para este modelo de 12.000 a 13.000 horas. Este cambio se podría realizar sin ninguna modificación al programa de mantenimiento planteado para este componente.

Figura 28. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Mandos Finales D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013.



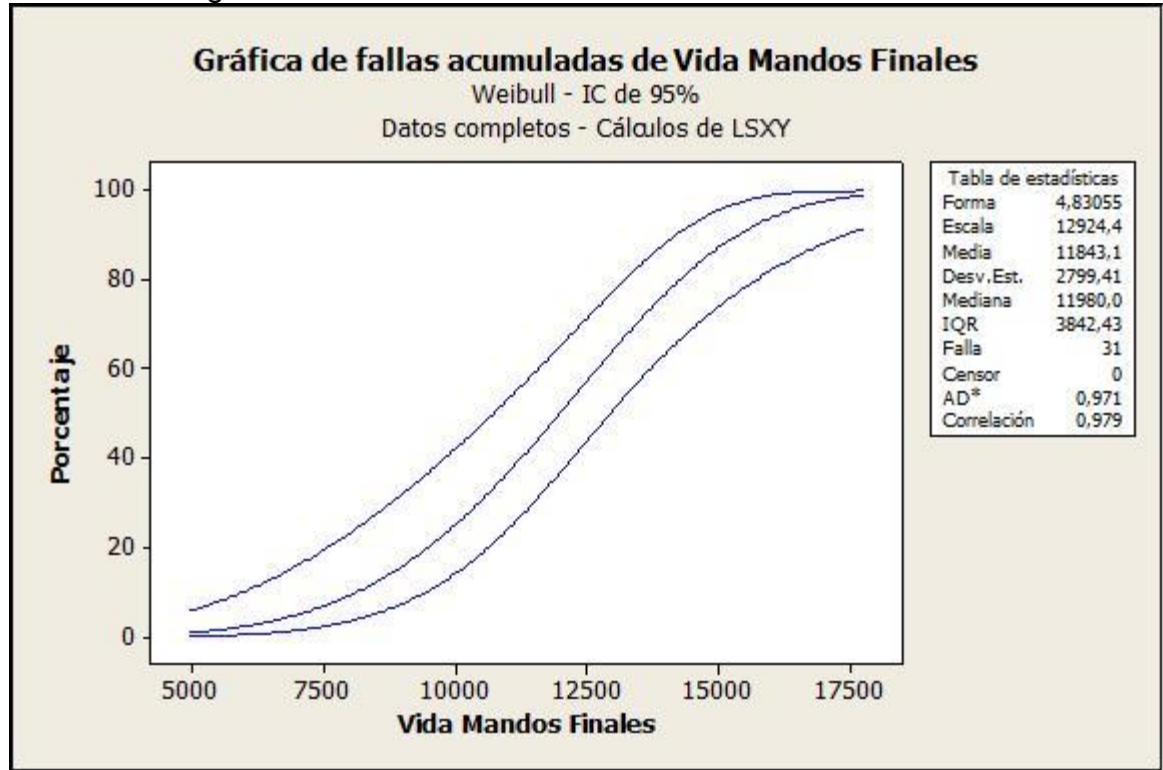
Fuente. El autor. Generada con Minitab.

Correlación. En este caso 0,979. Debe estar entre 0,95 y 1 para indicar que los datos están correctamente alineados para Weibull, por lo tanto se cumple con esa prueba.

En la figura 28 se grafica la supervivencia o confiabilidad de los mandos finales de tractores D10T de la mina Calenturitas en función de las horas acumuladas del componente. Se observa una confiabilidad del 98,6% para 5.300 horas. Cuando los componentes alcanzan las 8.500 horas, la confiabilidad se reduce al 82,8%. La supervivencia se reduce al 53,8% cuando los componentes alcanzan las 11.700 horas y solo el 13,6% de los mandos finales superan las 14.900 horas. La confiabilidad de este componente cuando llega al horómetro objetivo de 12.000 horas es del 49,6%.

La figura 29, grafica la tasa de fallas de los mandos finales según sus horas acumuladas. A medida que aumentan las horas de componente, aumenta la tasa de fallas. El patrón de la gráfica es característico de la fase III de la curva de la bañera donde los componentes fallan por desgaste o envejecimiento y concuerda con el parámetro de forma obtenido β de $4,83 > 1$.

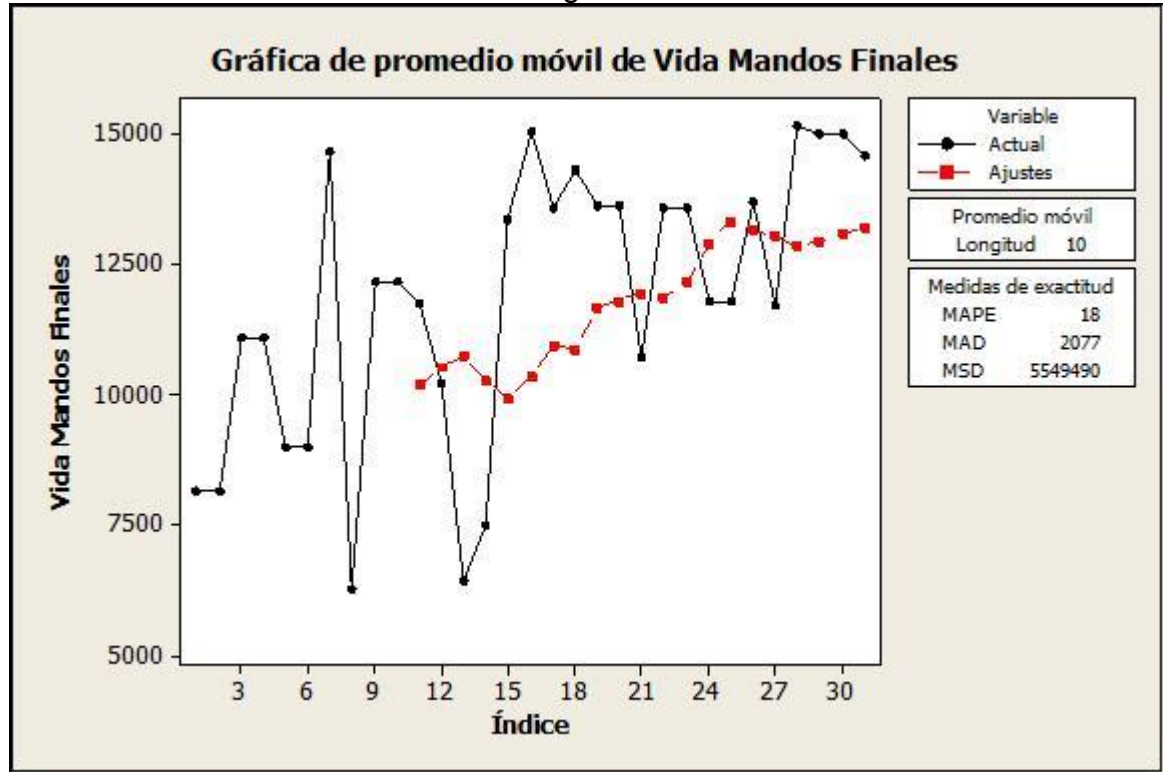
Figura 29. Gráfica de tasa de fallas de mandos finales D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

En la figura 30 se encuentra el promedio móvil de los últimos diez reemplazos. En esta gráfica se puede observar la tendencia de las horas con que se están reemplazando los mandos finales. Se observa una tendencia positiva. Esto significa que la frecuencia de reemplazo de los mandos finales en promedio se viene incrementando. Los últimos siete promedios muestran una tendencia a la estabilidad que es necesario mantener y si es posible incrementar. El valor pico del promedio móvil está en 13.322 horas y el valor valle en 9.904 horas. El último valor promedio es 13.197 horas; 1.197 horas por encima del valor objetivo y solo 197 horas por encima del parámetro de escala obtenido con la aplicación de Weibull.

Figura 30. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Mandos Finales D10T de la mina Calenturitas. Agosto 2009 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

3.7 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE RADIADORES

La tabla 14 muestra los datos válidos para reemplazo de radiadores con los que se realizará el análisis. La tabla 15 muestra los datos que fueron filtrados o removidos por considerarse no válidos por fallas prematuras reclamables por garantía o eventos del equipo.

Los datos de horómetro componente correspondientes a las horas con que fueron removidos los componentes por falla, monitoreo de condiciones o por mantenimiento preventivo, se introducen en el software estadístico Minitab para su tratamiento y posterior análisis, arrojando las siguientes gráficas y resultados.

Tabla 14. Detalle de los radiadores reemplazados. Datos válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T381	CAMBIO DE CORES DE RADIADOR	26/06/2010	13.363	13.363
2	T380	1353.00.CAMBIO DE CORES DE RADIADOR	29/09/2010	15.488	15.488
3	T378	1353.00.CC.00 RADIATOR	31/10/2010	14.775	14.775
4	T392	1353.00.CC.00 RADIATOR	07/11/2010	9.357	9.357
5	T377	1353.00.CC.00 RADIATOR	06/01/2011	16.173	16.173
6	T379	CAMBIO DE CORES DE RADIADOR	19/03/2011	17.147	17.147
7	T391	5D 1353.00.CC.00 RADIATOR	20/05/2011	13.015	13.015
8	T378	CAMBIO DE RADIADOR (TAPONADO PARTE INFERIOR)	06/01/2012	21.499	6.724
9	T377	CORE DE LOS RADIADORES TAPONADOS (CAMBIO)	21/04/2012	24.133	7.960
10	T379	CAMBIO DEL RADIADOR	08/05/2012	24.907	7.760
11	T380	FUGA DE REFRIGERANTE POR CORE N° 5	15/05/2012	25.414	9.926
12	T397	CAMBIO DE CORES DEL RADIADOR POR OBSTRUCCION	16/05/2012	6.812	6.812
13	T381	CORES DE RADIADOR DETERIORADO	20/06/2012	24.325	10.962
14	T393	CAMBIO DEL RADIADOR	31/08/2012	9.379	9.379
15	T396	CAMBIO DEL RADIADOR	28/09/2012	10.881	10.881
16	T392	CAMBIO DEL RADIADOR	16/02/2013	23.227	13.870
17	T391	CAMBIO DEL RADIADOR	09/07/2013	26.223	13.208
18	T377	CAMBIO DEL RADIADOR	24/09/2013	33.652	9.519

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

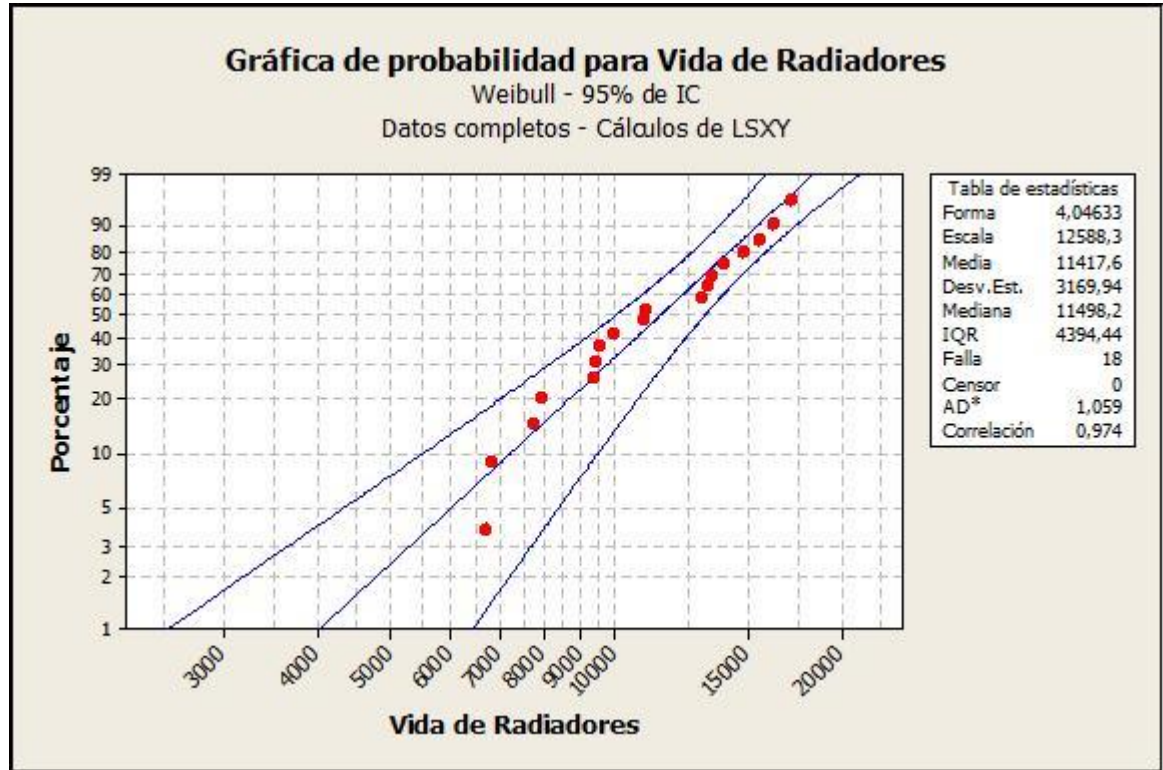
Tabla 15. Detalle de los radiadores reemplazados. Datos filtrados, no válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T395	CAMBIO DEL RADIADOR	24/02/2012	5.727	5.727
2	T398	CAMBIO DE CORES DE RADIADOR POR CONTAMINACION	28/03/2012	7.588	7.588
3	T395	CAMBIO DE CORES DE RADIADOR	03/09/2012	9.069	3.342
4	T378	CAMBIO DE CORES DE RADIADOR	04/10/2012	26.098	4.599
5	T393	CAMBIO DE CORES DEL RADIADOR	10/01/2013	11.601	2.221
6	T380	CAMBIO DE RADIADOR	14/03/2013	29.434	4.020
7	T397	CAMBIO DEL RADIADOR	29/03/2013	12.426	5.614
8	T381	CAMBIO DE CORES DEL RADIADOR	27/04/2013	29.302	4.977

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

En la gráfica de la figura 31 cada punto identifica un evento de reemplazo de componente ya sea por falla, por condición o por que por las horas acumuladas se considera que ha llegado al final de su vida útil. En el eje Y se encuentra el porcentaje de probabilidad de falla para el componente específico radiador. Según este gráfico componentes con 7.200 horas tienen solo el 10% de probabilidad de falla mientras que componentes con 15.500 horas tienen un 90% de probabilidad de falla.

Figura 31. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para radiadores de D10T de la mina Calenturitas. Junio 2010 - Diciembre 2013



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

El programa Minitab utilizado para realizar esta gráfica de probabilidad de Weibull también arroja los siguientes resultados:

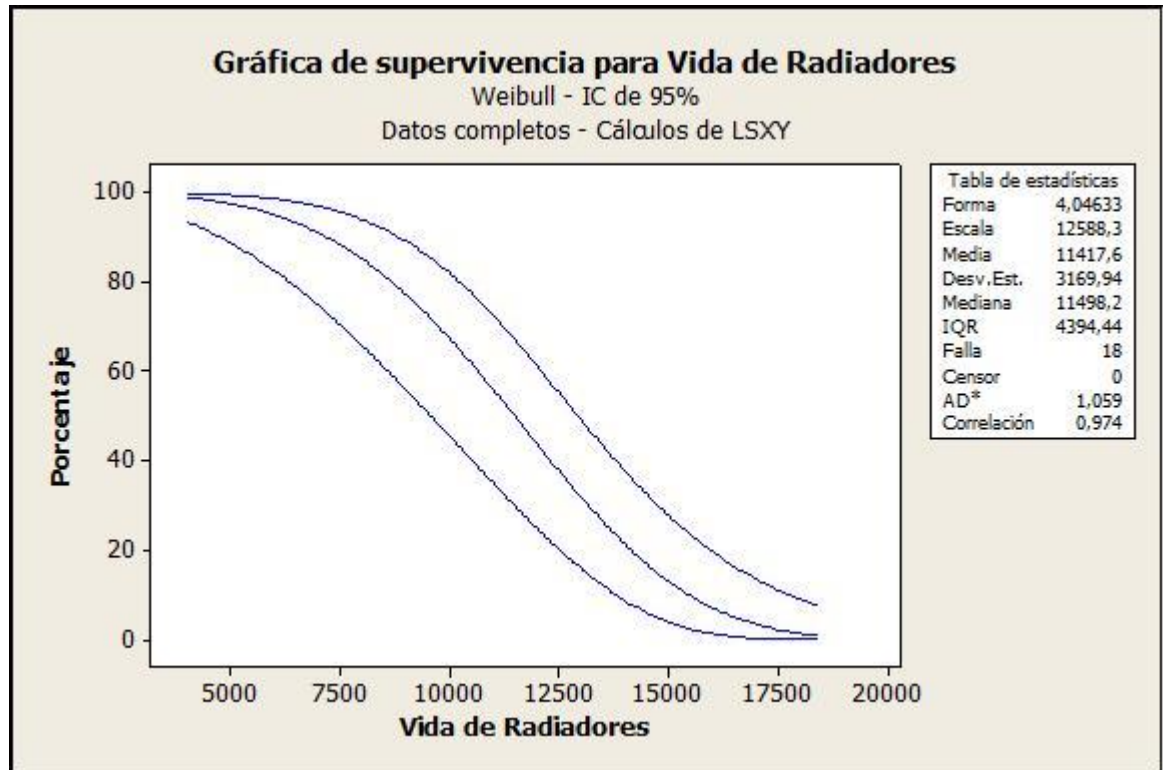
Parámetro de Forma (β). En este caso igual a 4,04. Este valor nos ubica en la zona de fallas por desgaste en la curva de la bañera de la figura 1. Esto nos indica que los datos corresponden a componentes que se encontraban en fase de envejecimiento o desgaste.

Parámetro de Escala o característica de vida útil (η). En este caso igual a 12.588,3 horas. Este es el parámetro objetivo y más importante de este estudio. Indica el valor real de vida útil de los radiadores de D10T en Calenturitas.

Este valor es superior al establecido inicialmente por planeación que esta en 12.000 horas. Esta diferencia indica que la vida real de los radiadores está por encima de lo estimado inicialmente en el LCC y está teniendo un impacto positivo en el balance financiero del proyecto. El costo por hora de cada radiador de D10T calculado inicialmente es en realidad inferior en un 4,9%.

En este caso es adecuado modificar la proyección de reemplazo de radiadores para este modelo de 12.000 a 12.500 horas. Este cambio se podría realizar sin ninguna modificación al programa de mantenimiento planteado para este componente.

Figura 32. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Radiadores D10T de la mina Calenturitas. Junio 2010 a Diciembre 2013.

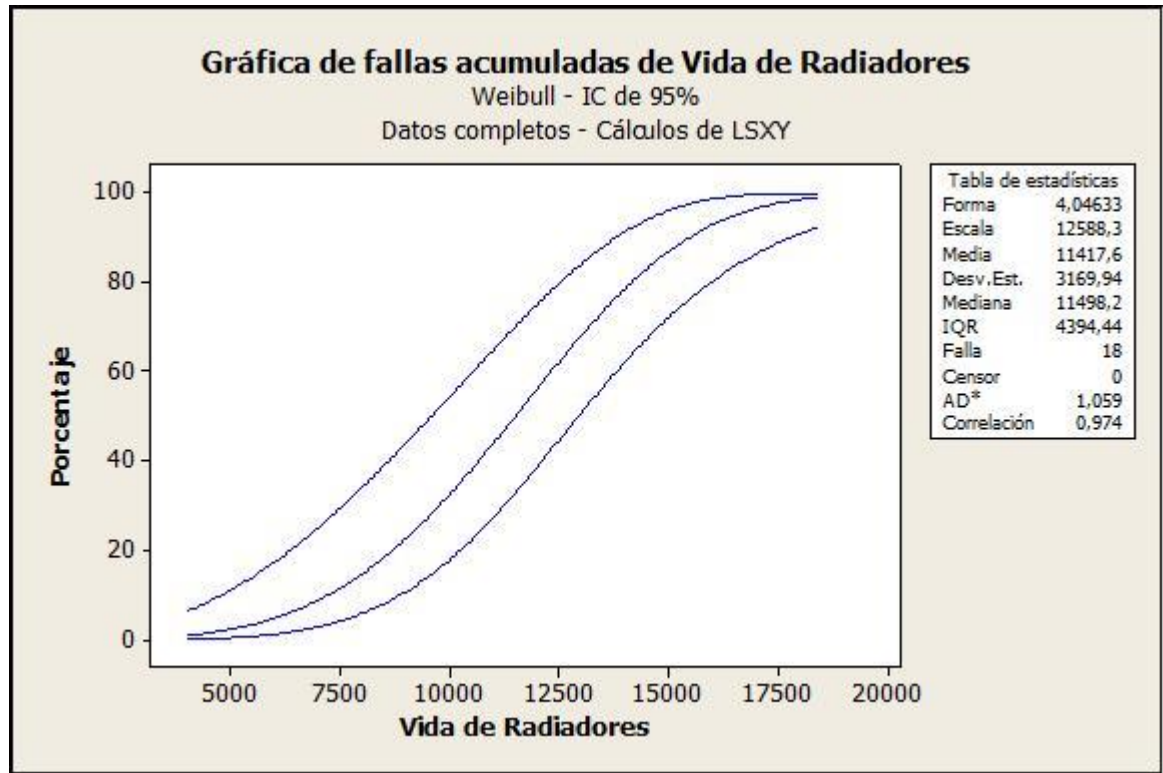


Fuente. El autor. Generada con Minitab.

Correlación. En este caso 0,974. Debe estar entre 0,95 y 1 para indicar que los datos están correctamente alineados para Weibull, por lo tanto se cumple con esa prueba.

En la figura 32 se grafica la supervivencia o confiabilidad de los radiadores de tractores D10T de la mina Calenturitas en función de las horas acumuladas del componente. Se observa una confiabilidad del 98,8% para 4.200 horas. Cuando los componentes alcanzan las 8.200 horas, la confiabilidad se reduce al 83,8%. La supervivencia se reduce al 51,1% cuando los componentes alcanzan las 11.400 horas y solo el 16,1% de los radiadores superan las 14.600 horas. La confiabilidad de este componente cuando llega al horómetro objetivo de 12.000 horas es del 43,8%.

Figura 33. Gráfica de tasa de fallas de radiadores D10T de la mina Calenturitas. Junio 2010 a Diciembre 2013.

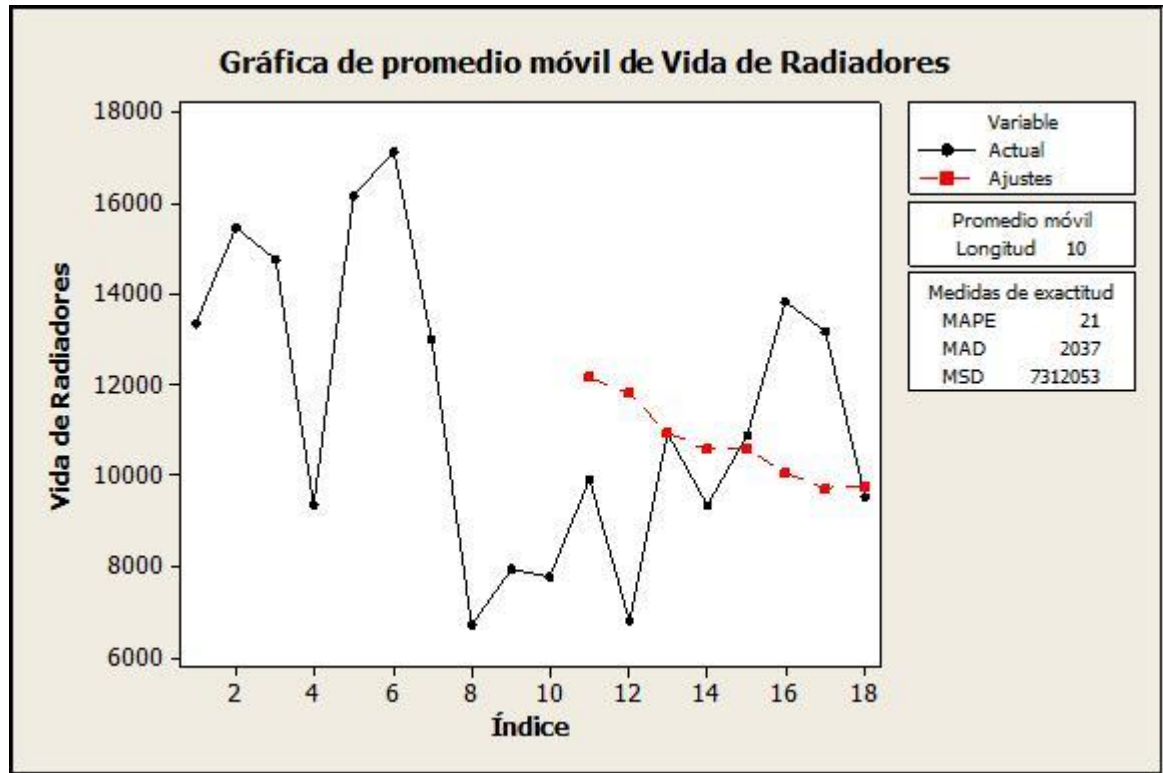


Fuente. El autor. Generada con Minitab.

La figura 33, grafica la tasa de fallas de los mandos finales según sus horas acumuladas. A medida que aumentan las horas de componente, aumenta la tasa de fallas. El patrón de la gráfica es característico de la fase III de la curva de la bañera donde los componentes fallan por desgaste o envejecimiento y concuerda con el parámetro de forma obtenido β de $4,04 > 1$.

En la figura 34 se encuentra el promedio móvil de los últimos diez reemplazos. En esta gráfica se puede observar la tendencia de las horas con que se están reemplazando los radiadores. Se observa una tendencia negativa. Esto significa que la frecuencia de reemplazo de los radiadores en promedio viene disminuyendo. El valor pico del promedio móvil esta en 12.176 horas y el valor valle en 9.728 horas. El último valor promedio es 9.748 horas; 2.252 horas por debajo del valor objetivo y 2.840 horas por debajo del parámetro de escala obtenido con la aplicación de Weibull. Se debe procurar por mejorar estos promedios realizando los cambios de radiador a las 12.500 horas como se esta recomendando.

Figura 34. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Radiadores D10T de la mina Calenturitas. Junio 2010 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

3.8 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE CILINDROS DE LEVANTE DE HOJA TOPADORA

La tabla 16 muestra los datos válidos para reemplazo de cilindros de levante de dozer con los que se realizará el análisis. La tabla 17 muestra los datos que fueron filtrados o removidos por considerarse no válidos por fallas prematuras reclamables por garantía o eventos del equipo.

Los datos de horómetro componente correspondientes a las horas con que fueron removidos los componentes por falla, monitoreo de condiciones o por mantenimiento preventivo, se introducen en software estadístico Minitab para su tratamiento y posterior análisis, arrojando las siguientes gráficas y resultados.

Tabla 16. Detalle de los cilindros de levante de dozer reemplazados. Datos válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T377	CAMBIO DE CILINDRO LEVANTE DEL DOZER RH	18/01/2010	11.117	11.117
2	T378	5102.RH.CC.00 LIFT/HOIST CYLINDER	16/03/2010	11.353	8.356
3	T379	5102.RH.CC.00 LIFT/HOIST CYLINDER	06/06/2010	12.651	10.897
4	T381	FUGA ACEITE CILINDRO LEVANTE DEL DOZER RH	26/06/2010	13.363	13.363
5	T379	FUGA POR CILINDRO DE LEVANTE LH DEL DOZER	03/09/2010	13.809	13.809
6	T380	5102.LH.CC.00 LIFT/HOIST CYLINDER	29/09/2010	15.488	15.488
7	T380	5102.RH.CC.00 LIFT/HOIST CYLINDER	29/09/2010	15.488	15.488
8	T381	FUGA POR CILINDRO LEVANTE LH	18/11/2010	15.223	15.223
9	T378	CUCHILLA BLOQUEADA (CAMBIO DE CILINDRO LENVATE LH)	02/12/2010	15.148	15.148
10	T377	FUGA CILINDRO LEVANTE DEL DOZER LH	06/01/2011	16.173	16.173
11	T377	CILINDRO DE LEVANTE RH CON FUGA	29/03/2011	17.610	6.493
12	T392	FUGA MINIMA CILINDRO LEVANTE LADO LH	09/04/2011	11.902	11.902
13	T378	CILINDRO LEVANTE CON FUGA RH	15/05/2011	17.770	6.416
14	T392	FUGA POR CILINDRO DE LEVANTE LADO RH	04/06/2011	12.702	12.702
15	T391	FUGA MINIMA POR EL CILINDRO DE LEVANTE LADO LH	02/07/2011	13.689	13.689
16	T381	CAMBIO CILINDRO DE LEVANTE DEL DOZER LADO LH	08/08/2011	19.526	4.303
17	T381	FUGA DE ACEITE POR CILINDRO DE LEVANTE DOZER RH	19/08/2011	19.709	6.346
18	T379	FUGA CILINDRO DE LEVANTE RH	02/11/2011	21.395	8.744
19	T391	FUGA DE ACEITE POR CILINDRO DE LEVANTE RH	03/11/2011	15.114	6.474
20	T377	FUGA MINIMA POR CILINDRO DE LEVANTE LADO LH	29/12/2011	22.315	6.640
21	T379	HUMEDAD POR EL CILINDRO DE LEVANTE DEL DOZER LADO LH	18/01/2012	22.761	8.953
22	T378	FUGA MINIMA POR CILINDRO DE LEVANTE LH	21/08/2012	25.270	9.607
23	T380	CAMBIO DEL CILINDRO IZQUIERDO DE LEVANTE DEL DOZER	10/09/2012	26.915	11.427
24	T381	FUGA CILINDRO LEVANTE RH POR SELLO (CAMBIAR)	01/10/2012	25.943	6.234
25	T380	CAMBIO DEL CILINDRO DERECHO DE LEVANTE DEL DOZER	24/10/2012	27.699	12.211
26	T396	CAMBIO DEL CILINDRO DERECHO DE LEVANTE DEL DOZER	06/11/2012	11.559	11.559
27	T378	HUMEDAD POR EL CILINDRO DE LEVANTE DEL DOZER LADO RH	01/12/2012	26.951	9.182
28	T391	CAMBIO DEL CILINDRO DERECHO DE LEVANTE DEL DOZER RH	05/12/2012	22.270	7.156
29	T392	HUMEDAD POR CILINDRO DE LEVANTE RH	28/12/2012	22.316	9.614
30	T393	FUGA MINIMA POR SELLO DE CILINDRO RH LEVANTE	10/01/2013	11.601	11.601
31	T392	FUGA MINIMA POR CILINDRO LEVANTE LH	24/01/2013	22.789	10.887
32	T396	FUGA ACEITE POR CILINDRO LEVANTE DOZER LH	13/03/2013	13.860	13.860
33	T397	CAMBIO DEL CILINDRO DERECHO DE LEVANTE DEL DOZER	29/03/2013	12.426	12.426
34	T397	CAMBIO DEL CILINDRO IZQUIERDO DE LEVANTE DEL DOZER	29/03/2013	12.426	12.426
35	T391	CAMBIO DEL CILINDRO LH DE LEVANTE DEL DOZER	01/04/2013	24.322	10.633
36	T381	FUGA POR CILINDRO DE LEVANTE LH	16/04/2013	29.116	9.590
37	T393	CAMBIO DEL CILINDRO IZQUIERDO DE LEVANTE DEL DOZER	16/04/2013	13.302	13.302
38	T378	FUGA ACEITE CILINDRO LEVANTE DOZER RH	26/04/2013	28.981	9.132
39	T377	FUGA POR CILINDRO DE LEVANTE DEL DOZZER LADO RH	15/05/2013	31.212	13.602
40	T395	CAMBIO DEL CILINDRO DERECHO DE LEVANTE DEL DOZER	14/06/2013	14.199	14.214
41	T395	CILINDRO LH LEVANTE DEL DOZER CON FUGA	14/06/2013	14.199	14.214
42	T398	CILINDRO DE LEVANTE DEL DOZER CON FUGA LADO RH	22/06/2013	16.095	16.095
43	T398	SELLO DE LABIO CILINDRO LEVANTE DOZER LH PARTIDO	27/07/2013	16.769	16.769
44	T377	HUMEDAD POR CILINDRO DE LEVANTE DEL DOZER LADO LH	24/09/2013	33.652	11.337
45	T377	IMPLEMENTO SE CAE CILINDRO LEVANTE DOZER RH FUGA INTERNA	13/10/2013	33.855	5.140
46	T378	CAMBIO DE CILINDRO DE LEVANTE DEL DOZER RH	08/12/2013	32.950	3.969

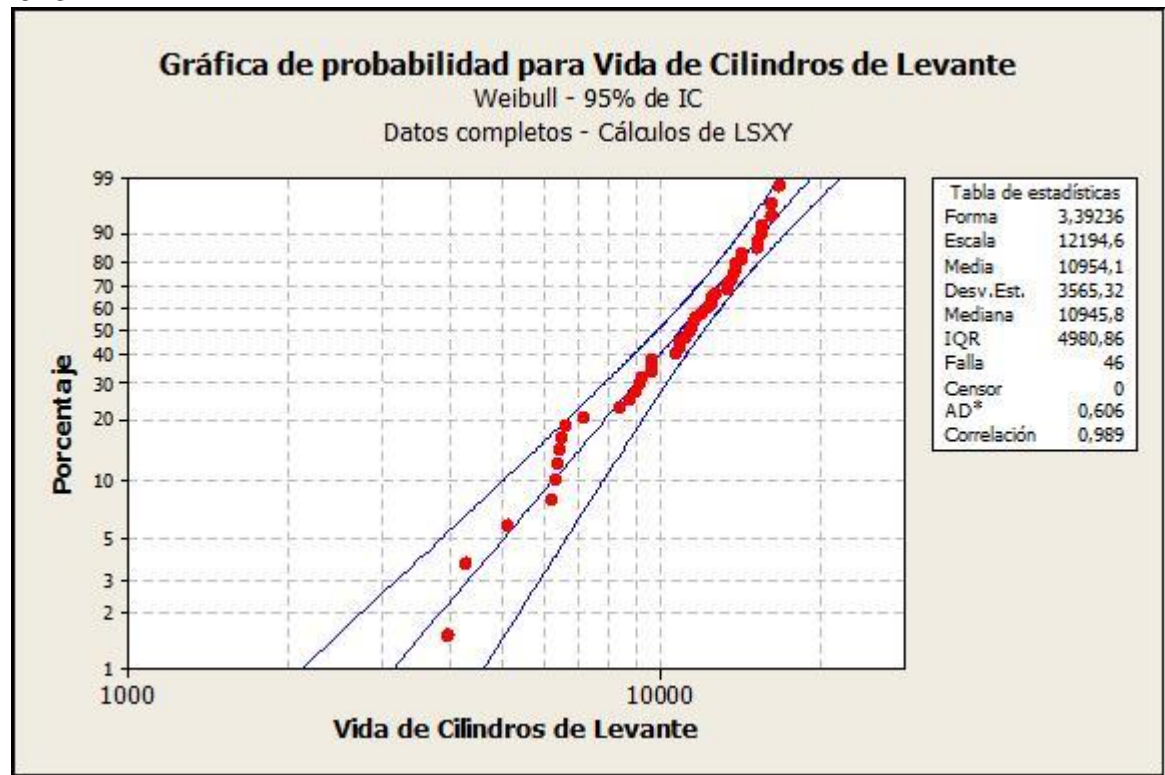
Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Tabla 17. Detalle de los cilindros de levante de dozer reemplazados. Datos filtrados, no válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T378	CAMBIO DE CILINDRO DE LEVANTE DE CUCHILLA RH	12/08/2008	1.987	1.987
2	T378	FUGA POR CILINDRO DE LEVANTE DE LA HOJA TOPADORA LADO RH	06/10/2008	2.997	1.011
3	T379	5102.RH.CC.00 LIFT/HOIST CYLINDER	08/11/2008	1.754	1.754
4	T379	5102.RH.CC.00 LIFT/HOIST CYLINDER	08/11/2008	1.754	0
5	T391	CROMADO CILINDRO LIFT RAYADO POR ACCIDENTE	17/09/2010	8.640	8.640
6	T378	CILINDRO LEVANTE DOZER LH (PARA INSTALAR EN T377)	04/01/2011	15.663	515
7	T395	CAMBIO CILINDRO DE LEVANTE DOZER RH POR CONTAMINACION	25/01/2012	5.399	5.399
8	T395	CAMBIO CILINDRO DE LEVANTE DOZER LH POR CONTAMINACION	25/01/2012	5.399	5.399
7	T378	CAMBIO DE CILINDRO DE LEVANTE DEL DOZER LADO RH	05/12/2012	27.012	61
8	T381	CILINDRO DE LEVANTE DEL DOZER RH CON FUGA	05/04/2013	28.918	2.975
9	T392	FUGA POR CILINDRO DE LEVANTE DEL DOZZER LADO RH	10/07/2013	25.294	2.978
10	T397	FUGA DE ACEITE POR EL CYLINDRO DE LEVANTE LH DOZER MINIMO	27/10/2013	15.383	2.957

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Figura 35. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para cilindros de levante de dozer de D10T de la mina Calenturitas. Enero 2010 - Diciembre 2013



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

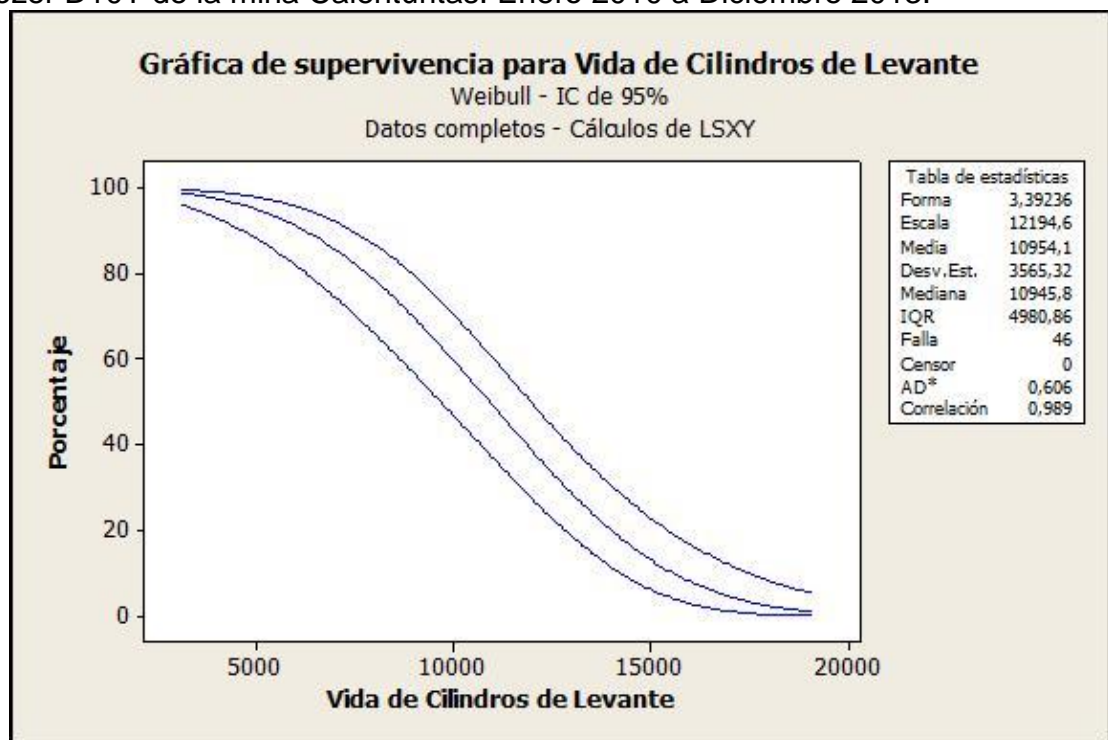
En la gráfica de la figura 35 cada punto identifica un evento de reemplazo de componente ya sea por falla, por condición o por que por las horas acumuladas se considera que ha llegado al final de su vida útil. En el eje Y se encuentra el porcentaje de probabilidad de falla para el componente específico cilindro de levante de dozer. Según este gráfico componentes con 6.300 horas tienen el 10% de probabilidad de falla mientras que componentes con 15.600 horas tienen un 90% de probabilidad de falla.

El programa Minitab utilizado para realizar esta gráfica de probabilidad de Weibull también arroja los siguientes resultados:

Parámetro de Forma (β). En este caso igual a 3,39. Este valor nos ubica en la zona de fallas por desgaste en la curva de la bañera de la figura 1. Esto nos indica que los datos corresponden a componentes que se encontraban en fase de envejecimiento o desgaste.

Parámetro de Escala o característica de vida útil (η). En este caso igual a 12.194,3 horas. Este es el parámetro objetivo y más importante de este estudio. Indica el valor real de vida útil de los cilindros de levante de dozer de D10T en Calenturitas.

Figura 36. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Cilindros de Levante de Dozer D10T de la mina Calenturitas. Enero 2010 a Diciembre 2013.



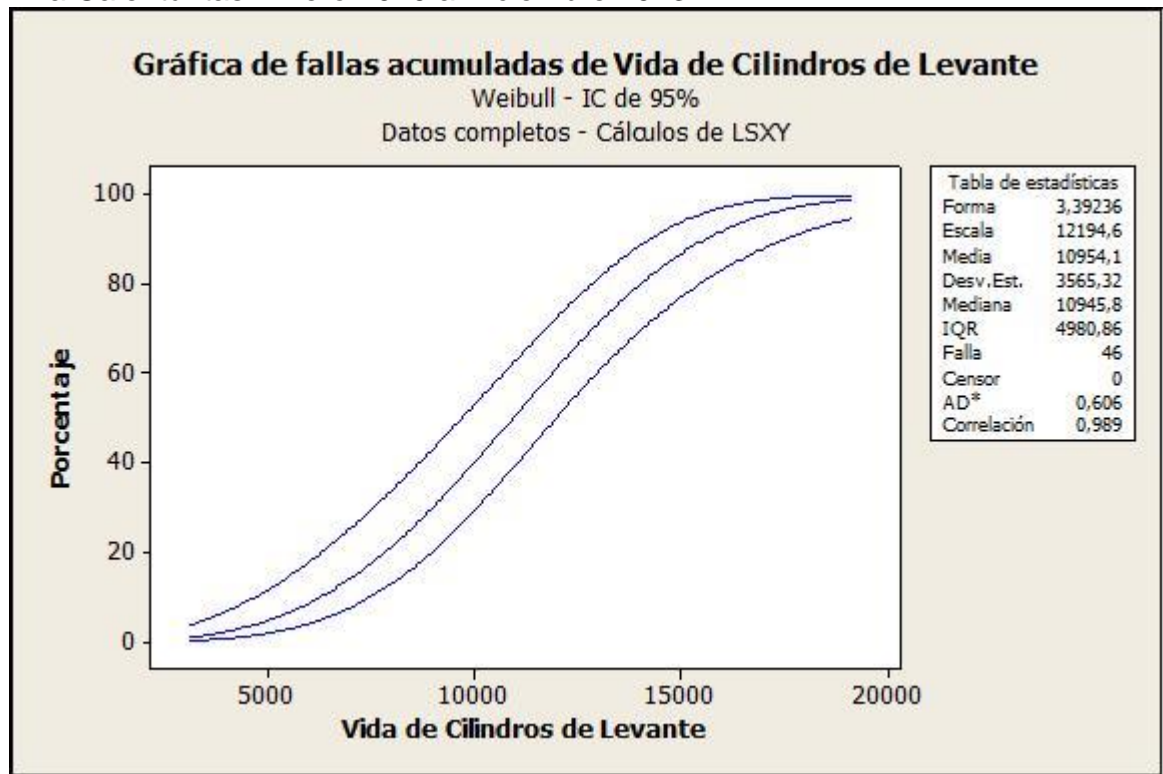
Fuente. El autor. Generada con Minitab.

Este valor es muy superior al establecido inicialmente por planeación que esta en 6.000 horas. Esta diferencia indica que la vida real de los cilindros de levante de dozer duplica lo estimado inicialmente en el LCC, teniendo así un impacto positivo en el balance financiero del proyecto. El costo por hora de cada cilindro de levante de D10T calculado inicialmente es en realidad inferior en un 103,2%.

En este caso es adecuado modificar la proyección de reemplazo de cilindros de levante de dozer para este modelo de 6.000 a 12.000 horas. Este cambio se podría realizar sin ninguna modificación al programa de mantenimiento planteado para este componente.

Correlación. En este caso 0,989. Debe estar entre 0,95 y 1 para indicar que los datos están correctamente alineados para Weibull, por lo tanto se cumple con esa prueba.

Figura 37. Gráfica de tasa de fallas de cilindros de levante de Dozer D10T de la mina Calenturitas. Enero 2010 a Diciembre 2013.

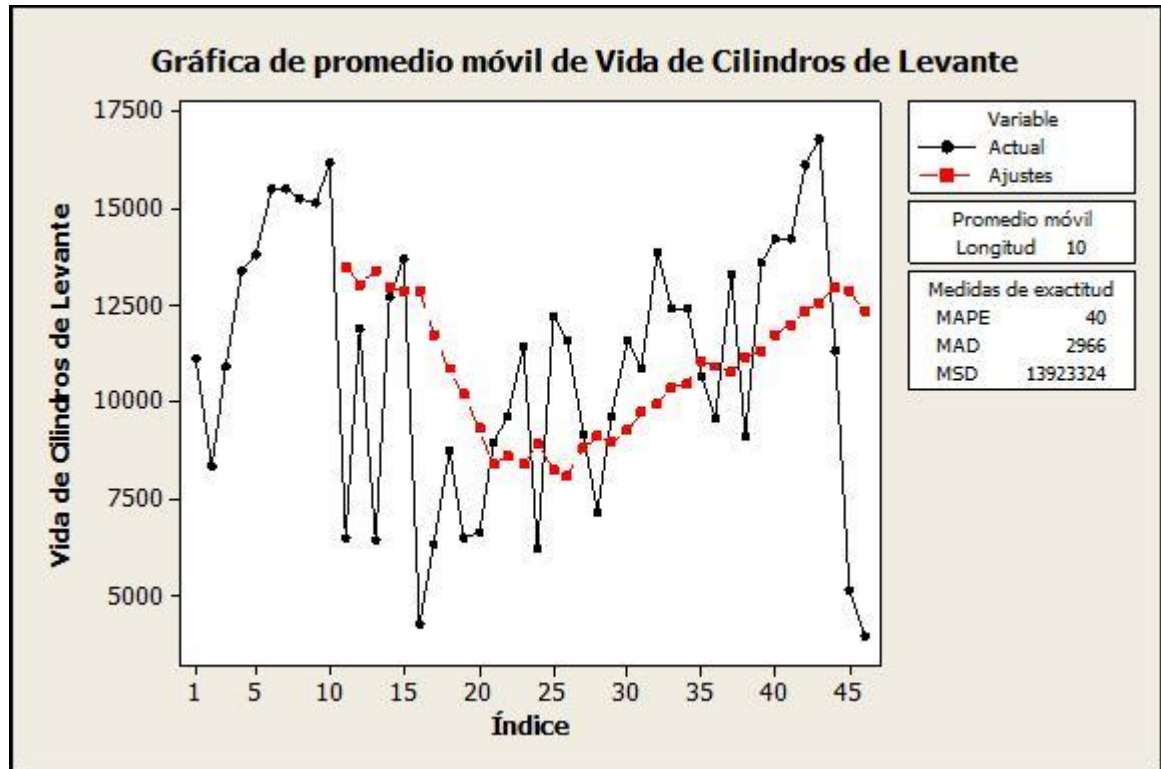


Fuente. El autor. Generada con Minitab.

En la figura 36, se grafica la supervivencia o confiabilidad de los cilindros de levante de tractores D10T de la mina Calenturitas en función de las horas acumuladas del componente. Se observa una confiabilidad del 97% para 4.000

horas. Cuando los componentes alcanzan las 7.400 horas, la confiabilidad se reduce al 83%. La supervivencia se reduce al 52% cuando los componentes alcanzan las 10.700 horas y solo el 13% de los cilindros superan las 15.000 horas. La confiabilidad de este componente cuando llega al horómetro objetivo de 6.000 horas es del 91,2%.

Figura 38. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Cilindros de levante de Dozer D10T de la mina Calenturitas. Enero 2010 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

La figura 37, grafica la tasa de fallas de los cilindros de levante según sus horas acumuladas. A medida que aumentan las horas de componente, aumenta la tasa de fallas. El patrón de la gráfica es característico de la fase III de la curva de la bañera donde los componentes fallan por desgaste o envejecimiento y concuerda con el parámetro de forma obtenido β de $3,39 > 1$.

En la figura 38 se encuentra el promedio móvil de los últimos diez reemplazos. En esta gráfica se puede observar la tendencia de las horas con que se están reemplazando los cilindros de levante. Se observa una tendencia negativa en el primer tercio de promedios de reemplazos y positiva de allí en adelante. Esto significa que la frecuencia de reemplazo de los cilindros de levante de dozer en promedio se viene incrementando. El valor pico del promedio móvil esta en

13.506 horas y el valor valle en 8.094 horas. Los datos de los dos últimos tercios de los promedios tienen tendencia positiva que está llegando a valores ligeramente superiores a 12000 horas que se deben mantener en el futuro. El último valor promedio es 12.339 horas; 6.339 horas por encima del valor objetivo y 145 horas por encima del parámetro de escala obtenido con la aplicación de Weibull.

3.9 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE CILINDROS DE INCLINACION DE HOJA TOPADORA

La tabla 18 muestra los datos que fueron filtrados o removidos por considerarse no válidos por fallas prematuras reclamables por garantía o eventos del equipo. La tabla 19 muestra los datos válidos para reemplazo de cilindros de inclinación de dozer con los que se realizará el análisis.

Tabla 18. Detalle de los cilindros de inclinación de dozer reemplazados. Datos filtrados, no válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T378	5104.RH.CC.00 TILT CYLINDER DOZER	04/01/2011	15.663	2.537
2	T378	5104.LH.CC.00 TILT CYLINDER DOZER	04/01/2011	15.663	1.346
3	T380	CAMBIO DE CILINDRO PARA INSTALAR AL T379	07/02/2011	17.554	2.066
4	T392	CILINDRO INCLINACION DE HOJA LH CON SELLO DE LABIO RAJADO	09/04/2011	11.902	1.599
5	T381	CAMBIO DE CILINDRO DE INCLINACION DEL DOZER LH	18/05/2011	18.072	2.850
6	T381	5104.LH.CC.00 TILT CYLINDER	03/06/2011	18.407	334
7	T381	CILINDRO DE INCLINACION LH CON PASAMANOS INVERTIDOS	04/09/2011	19.991	1.584
8	T395	CAMBIO CILINDRO INCLINACION DOZER LH POR CONTAMINACION	25/01/2012	5.399	5.399
9	T395	CAMBIO CILINDRO INCLINACION DOZER RH POR CONTAMINACION	25/01/2012	5.399	5.399

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Los datos de horómetro componente correspondientes a las horas con que fueron removidos los componentes por falla, monitoreo de condiciones o por mantenimiento preventivo, se introducen en un software estadístico para su tratamiento y posterior análisis. En este caso se usó Minitab, arrojando las siguientes gráficas y resultados.

En la gráfica de la figura 39 cada punto identifica un evento de reemplazo de componente ya sea por falla, por condición o por que por las horas acumuladas se considera que ha llegado al final de su vida útil. En el eje Y se encuentra el porcentaje de probabilidad de falla para el componente específico cilindro de

inclinación de dozer. Según este gráfico, componentes con 7.300 horas tienen el 10% de probabilidad de falla mientras que componentes con 17.500 horas tienen un 90% de probabilidad de falla.

Tabla 19. Detalle de los cilindros de inclinación de dozer reemplazados. Datos válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T379	CILINDRO DE INCLIANCION RH TIENE FUGA INTERNA	16/12/2009	9.403	9.403
2	T381	5104.RH.CC.00 TILT CYLINDER	16/05/2010	12.591	12.591
3	T378	FUGA POR CILINDRO INCLINACION CUCHILLA LADO RH	23/07/2010	13.125	13.125
4	T377	FUGA POR CILINDRO DE INCLINACION DEL DOZER RH	31/08/2010	14.228	14.228
5	T380	CAMBIO CILINDRO INCLINACION LH DOZER	29/09/2010	15.488	15.488
6	T378	FUGA POR CILINDRO INCLINACION DE LA CUCHILLA LADO LH	05/10/2010	14.316	14.316
7	T381	5104.LH.CC.00 TILT CYLINDER	18/11/2010	15.223	15.223
8	T377	5104.LH.CC.00 TILT CYLINDER	06/01/2011	16.173	16.173
9	T392	5104.RH.CC.00 TILT CYLINDER	09/01/2011	10.304	10.304
10	T392	5104.LH.CC.00 TILT CYLINDER	09/01/2011	10.304	10.304
11	T380	5104.RH.CC.00 TILT CYLINDER	23/01/2011	17.283	17.283
12	T391	5104.RH.CC.00 TILT CYLINDER	28/01/2011	11.008	11.008
13	T379	FUGA CILINDRO INCLINACION LH	12/02/2011	16.576	16.576
14	T379	CAMBIO DE CILINDRO INCLINACION DEL DOZER RH	26/05/2011	18.450	9.047
15	T377	CAMBIO DE CILINDRO DE INCLINACION DEL DOZER LADO RH	20/06/2011	18.977	4.750
16	T392	FUGA MINIMA POR EL CILINDRO DE INCLINACION DEL DOZER LADO RH	06/11/2011	15.126	7.459
17	T377	FUGA DE ACEITE POR CILINDRO INCLINACION DOZER LADO LH	11/11/2011	21.603	5.430
18	T379	FUGA POR CILINDRO DE INCLINACION LH	07/01/2012	22.538	8.153
19	T391	CAMBIO DEL CILINDRO DERECHO DE INCLINACION DEL DOZER RH	07/02/2012	16.774	5.766
20	T391	FUGA DE ACEITE POR CILINDRO INCLINACION DOZER LADO LH	07/02/2012	16.774	16.774
21	T391	FUGA POR CILINDRO DE INCLINACION DEL DOZER LADO LH	23/09/2012	20.925	9.880
22	T381	HUMEDAD MONITOREABLE POR CILINDRO INCLINACION RH DEL DOZER	17/10/2012	26.157	13.566
23	T377	CILINDRO DE INCLINACION DEL DOZER LH CON FUGA	11/11/2012	27.694	7.659
24	T398	FUGA POR CILINDRO DE INCLINACION DEL DOZER LH	22/11/2012	12.211	12.211
25	T392	CAMBIO DEL CILINDRO IZQUIERDO DE INCLINACION DEL DOZER	24/01/2013	22.789	10.887
26	T398	CAMBIO DEL CILINDRO DERECHO DE INCLINACION DEL DOZER	03/02/2013	13.442	13.442
27	T378	CAMBIO DEL CILINDRO DERECHO DE INCLINACION DEL DOZER	21/04/2013	28.919	13.256
28	T396	CILINDRO DE INCLINACION DEL DOZER LADO LH CON FUGA CRITICA	05/06/2013	15.546	15.546
29	T378	CAMBIO DEL CILINDRO IZQUIERDO DE INCLINACION DEL DOZER	16/06/2013	29.684	14.022
30	T396	CAMBIO DEL CILINDRO DERECHO DE INCLINACION DEL DOZER	04/09/2013	17.070	17.070
31	T393	FUGA POR SELLO EN CILINDRO INCLINACION DEL DOZER LH	10/09/2013	15.921	15.921
32	T397	CAMBIO DEL CILINDRO DERECHO DE INCLINACION DEL DOZER	27/10/2013	15.383	15.383
33	T397	CAMBIO DEL CILINDRO IZQUIERDO DE INCLINACION DEL DOZER	27/10/2013	15.383	15.383
34	T377	CAMBIO DEL CILINDRO DERECHO DE INCLINACION DEL DOZER	01/12/2013	34.717	15.740

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

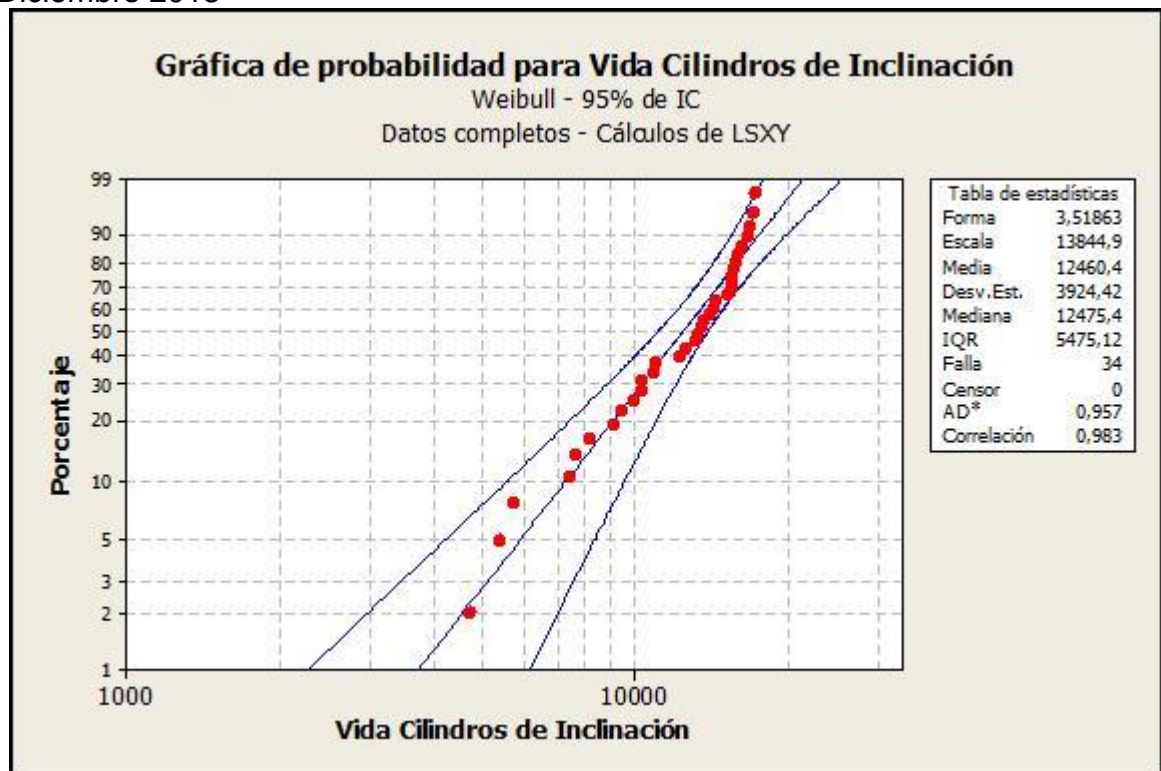
El programa Minitab utilizado para realizar esta gráfica de probabilidad de Weibull también arroja los siguientes resultados:

Parámetro de Forma (β). En este caso igual a 3,51. Este valor nos ubica en la zona de fallas por desgaste en la curva de la bañera. Esto nos indica que los datos corresponden a componentes que se encontraban en fase de envejecimiento o desgaste.

Parámetro de Escala o característica de vida útil (η). En este caso igual a 13.844,9 horas. Este es el parámetro objetivo y más importante de este estudio. Indica el valor real de vida útil de los cilindros de levante de inclinación de D10T en Calenturitas.

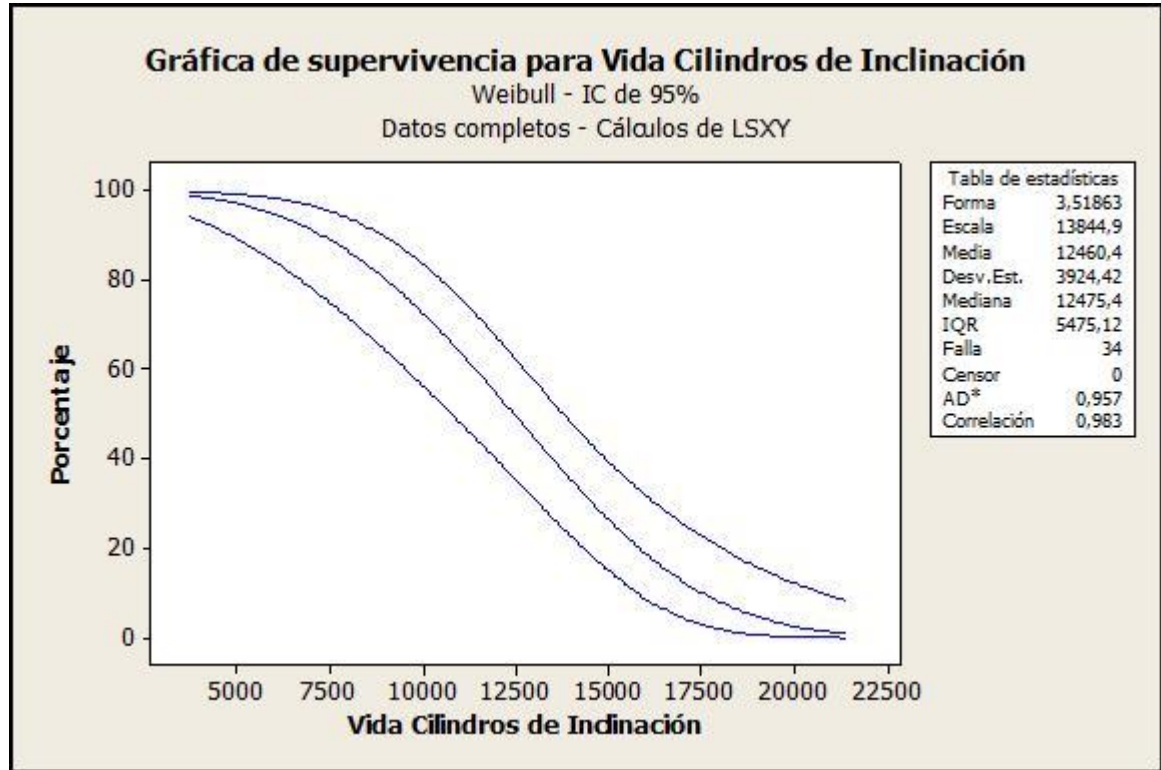
Este valor es muy superior al establecido inicialmente por planeación que esta en 6.000 horas. Esta diferencia indica que la vida real de los cilindros de inclinación de dozer duplica lo estimado inicialmente en el LCC, teniendo así un impacto positivo en el balance financiero del proyecto. El costo por hora de cada cilindro de inclinación de D10T calculado inicialmente es en realidad inferior en un 130,7%.

Figura 39. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para cilindros de inclinación de dozer de D10T de la mina Calenturitas. Diciembre 2009 - Diciembre 2013



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

Figura 40. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Cilindros de Inclinación de Dozer D10T de la mina Calenturitas. Diciembre 2009 a Diciembre 2013.



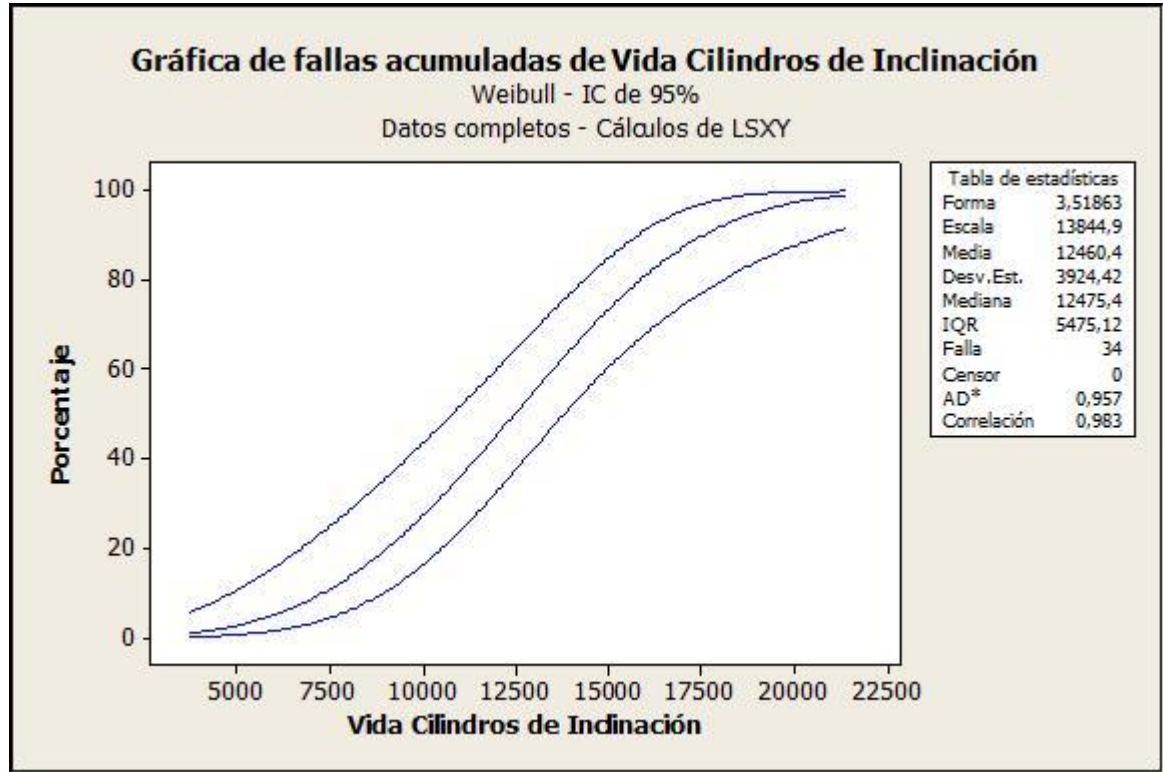
Fuente. El autor. Generada con Minitab.

En este caso es adecuado modificar la proyección de reemplazo de cilindros de inclinación de dozer para este modelo de 6.000 a 14.000 horas. Este cambio se podría realizar sin ninguna modificación al programa de mantenimiento planteado para este componente.

Correlación. En este caso 0,983. Debe estar entre 0,95 y 1 para indicar que los datos están correctamente alineados para Weibull, por lo tanto se cumple con esa prueba.

En la figura 40, se grafica la supervivencia o confiabilidad de los cilindros de inclinación de dozer de tractores D10T de la mina Calenturitas en función de las horas acumuladas del componente. Se observa una confiabilidad del 98,7% para 4.000 horas. Cuando los componentes alcanzan las 9.000 horas, la confiabilidad se reduce al 80,2%. La supervivencia se reduce al 54,6% cuando los componentes alcanzan las 12.000 horas y solo el 12,7% de los cilindros superan las 17.000 horas. La confiabilidad de este componente cuando llega al horómetro objetivo de 6.000 horas es del 94,8%.

Figura 41. Gráfica de tasa de fallas de Cilindros de Inclinación de Dozer D10T de la mina Calenturitas. Diciembre 2009 a Diciembre 2013.

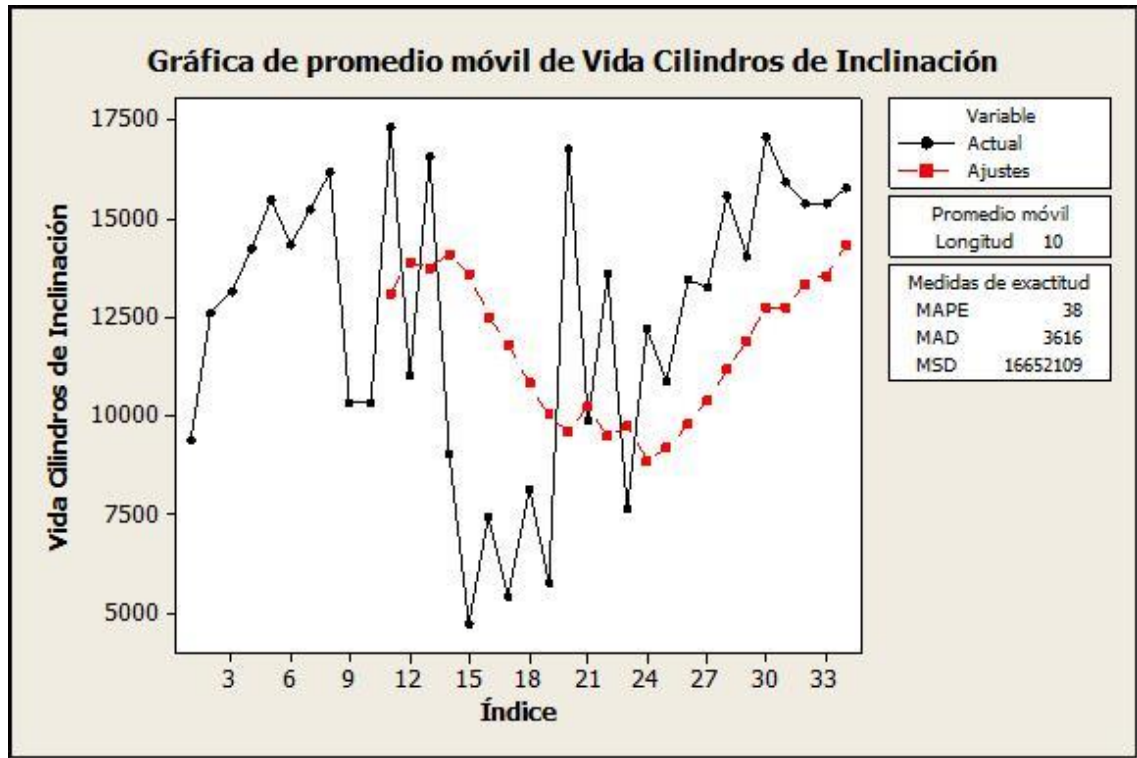


Fuente. El autor. Generada con Minitab.

La figura 41, grafica la tasa de fallas de los cilindros de inclinación según sus horas acumuladas. A medida que aumentan las horas de componente, aumenta la tasa de fallas. El patrón de la gráfica es característico de la fase III de la curva de la bañera donde los componentes fallan por desgaste o envejecimiento y concuerda con el parámetro de forma obtenido β de $3,51 > 1$.

En la figura 42 se encuentra el promedio móvil de los últimos diez reemplazos. En esta gráfica se puede observar la tendencia de las horas con que se están reemplazando los cilindros de inclinación de dozer. Se observa una tendencia negativa en la primera mitad de los promedios de reemplazos y positiva de allí en adelante. Esto significa que la frecuencia de reemplazo de los cilindros de inclinación de dozer en promedio se viene incrementando. El valor pico del promedio móvil esta en 14.090 horas y el valor valle en 8.848 horas. Los datos de la segunda mitad de los promedios tienen tendencia positiva que está llegando a valores cercanos a 14.000 horas que se deben mantener en el futuro. El último valor promedio es 14.312 horas; 8.312 horas por encima del valor objetivo y 467 horas por encima del parámetro de escala obtenido con la aplicación de Weibull.

Figura 42. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Cilindros de Inclinación de Dozer D10T de la mina Calenturitas. Diciembre 2009 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

3.10 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE CILINDROS DE LEVANTE DE DESGARRADOR

La tabla 20 muestra el único dato filtrado o removido por considerarse no válido por ser consecuencia de una contaminación del sistema. La tabla 21 muestra los datos válidos para reemplazo de cilindros de levante de desgarrador o ripper con los que se realizará el análisis.

Tabla 20. Detalle de los cilindros de levante de ripper reemplazados. Datos filtrados, no válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T395	CAMBIO CILINDRO LEVANTE RIPPER LH POR CONTAMINACION	25/01/2012	5.399	5.399

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Tabla 21. Detalle de los cilindros de levante de ripper reemplazados. Datos válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T378	5352.LH.CC.00 RIPPER LIFT CYLINDER	23/03/2010	11.386	11.386
2	T377	5352.LH.CC.00 RIPPER LIFT CYLINDER	06/01/2011	16.173	16.173
3	T377	5352.RH.CC.00 RIPPER LIFT CYLINDER	06/01/2011	16.173	16.173
4	T378	5352.RH.CC.00 RIPPER LIFT CYLINDER	26/01/2011	15.869	15.869
5	T392	PARTIO TORNILLO CILINDRO RIPPER LH	15/10/2011	14.784	14.784
6	T391	CAMBIO CILINDRO LH LEVANTE RIPPER	03/03/2012	17.172	17.172
7	T391	CAMBIO CILINDRO RH LEVANTE RIPPER	05/12/2012	22.270	22.270
8	T398	CAMBIO DEL CILINDRO DERECHO DE LEVANTE DEL RIPPER	03/01/2013	12.901	12.901
9	T398	CAMBIO DEL CILINDRO IZQUIERDO DE LEVANTE DEL RIPPER	03/01/2013	12.901	12.901
10	T397	PARTIO TAPA DEL CILINDRO DE LEVANTE DEL RIPPER LH	05/02/2013	11.489	11.489
11	T392	CAMBIO DE CILINDRO DE LEVANTE LH DEL RIPPER	10/02/2013	23.098	8.314
12	T392	5352.RH.CC.00 RIPPER LIFT CYLINDER	10/04/2013	23.787	23.787
13	T391	CAMBIO DE CILINDRO DE LEVANTE DEL RIPPER	09/07/2013	26.223	3.953
14	T395	FUGA POR SELLO CILINDRO LEVANTE RIPPER LH	09/11/2013	16.778	16.778
15	T377	CAMBIO CILINDRO LH LEVATE RIPPER	01/12/2013	34.717	18.544
16	T377	CAMBIO CILINDRO RH LEVANTE RIPPER	01/12/2013	34.717	18.544

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Los datos de horómetro componente correspondientes a las horas con que fueron removidos los componentes por falla, monitoreo de condiciones o por mantenimiento preventivo, se llevan al software estadístico Minitab para su tratamiento y posterior análisis, arrojando las siguientes gráficas y resultados.

En la gráfica de la figura 43 cada punto identifica un evento de reemplazo de componente ya sea por falla, por condición o por que por las horas acumuladas se considera que ha llegado al final de su vida útil. En el eje Y se encuentra el porcentaje de probabilidad de falla para el componente específico cilindro de levante de ripper. Según este gráfico, componentes con 7.700 horas tienen el 10% de probabilidad de falla mientras que componentes con 22.900 horas tienen un 90% de probabilidad de falla.

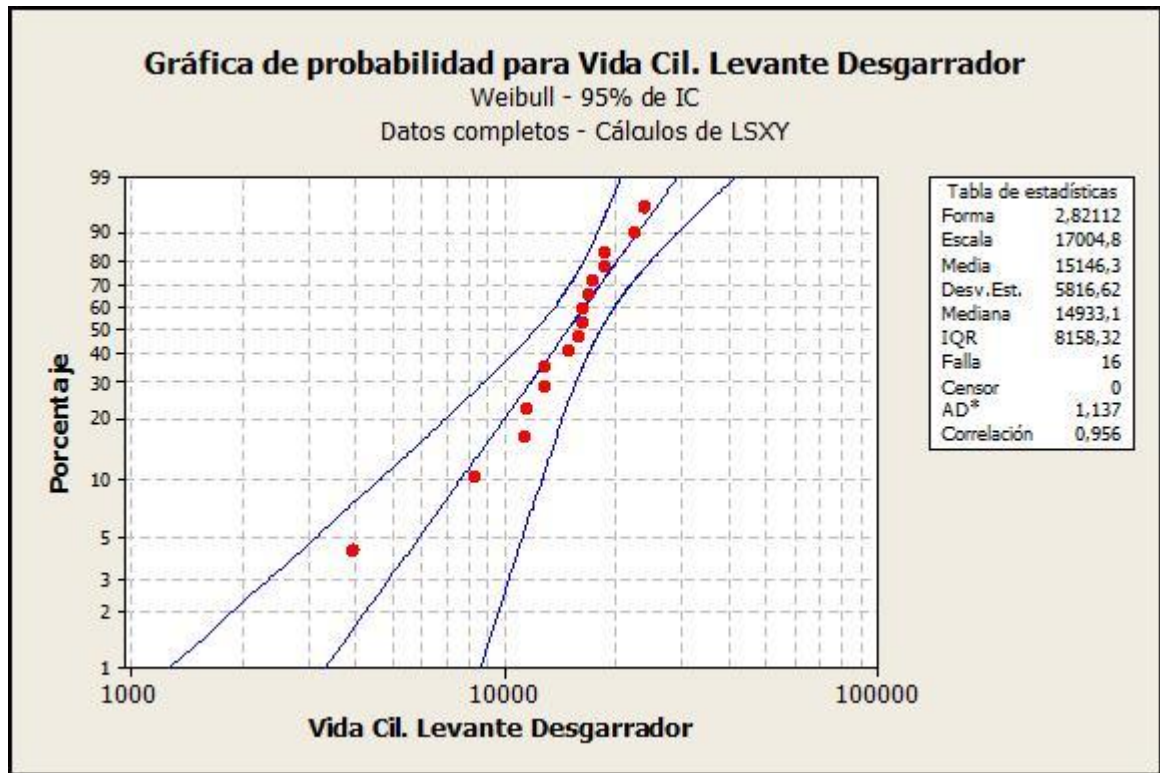
El programa Minitab utilizado para realizar esta gráfica de probabilidad de Weibull también arroja los siguientes resultados:

Parámetro de Forma (β). En este caso igual a 2,82. Este valor nos ubica en la zona de fallas por desgaste en la curva de la bañera. Esto nos indica que los datos corresponden a componentes que se encontraban en fase de envejecimiento o desgaste.

Parámetro de Escala o característica de vida útil (η). En este caso igual a 17.004,8 horas. Este es el parámetro objetivo y más importante de este estudio.

Indica el valor real de vida útil de los cilindros de levante de inclinación de D10T en Calenturitas.

Figura 43. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para cilindros de levante de ripper de D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 - Diciembre 2013.



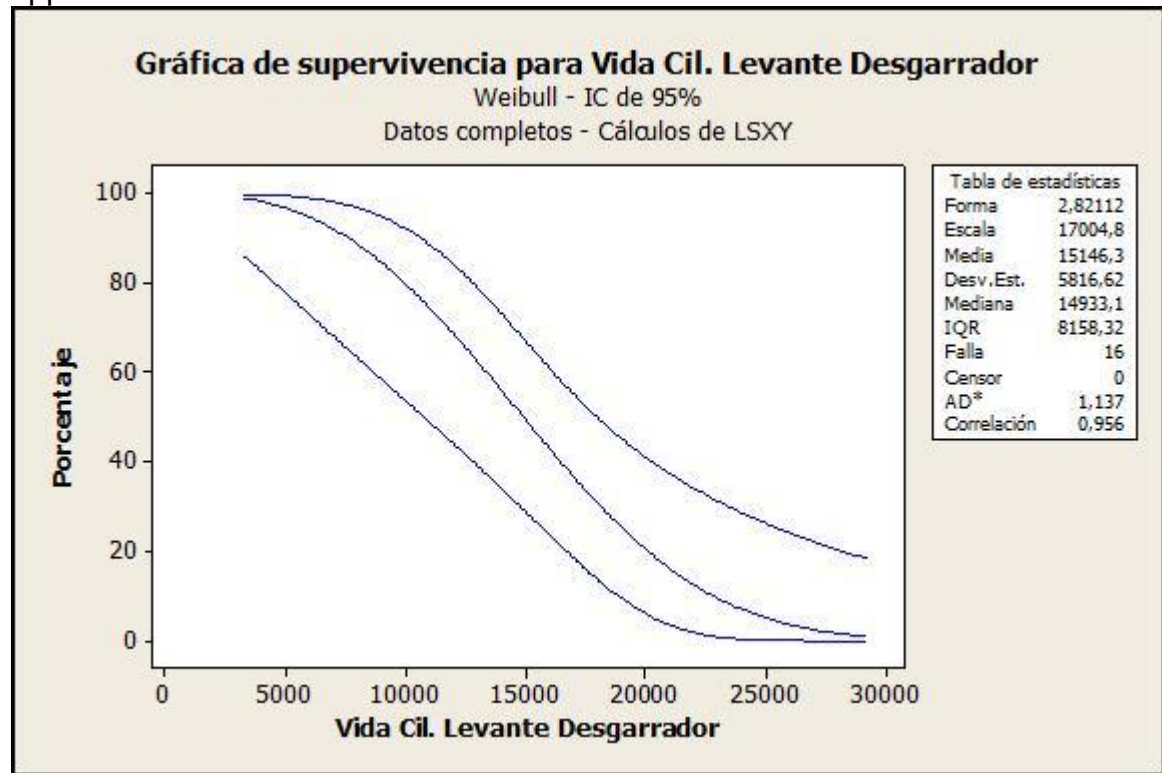
Fuente. El autor. Generada con Minitab.

Este valor es muy superior al establecido inicialmente por planeación que esta en 6.000 horas. Esta diferencia indica que la vida real de los cilindros de levante de ripper casi triplica lo estimado inicialmente en el LCC, teniendo así un impacto positivo en el balance financiero del proyecto. El costo por hora de cada cilindro de levante de ripper D10T calculado inicialmente es en realidad inferior en un 183,4%.

En este caso es adecuado modificar la proyección de reemplazo de cilindros de inclinación de dozer para este modelo de 6.000 a 17.000 horas. Este cambio se podría realizar sin ninguna modificación al programa de mantenimiento planteado para este componente.

Correlación. En este caso 0,956. Debe estar entre 0,95 y 1 para indicar que los datos están correctamente alineados para Weibull. En este caso se cumple con esa prueba.

Figura 44. Gráfica de Supervivencia o Confiabilidad para Cilindros de Levante de Ripper D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 a Diciembre 2013.



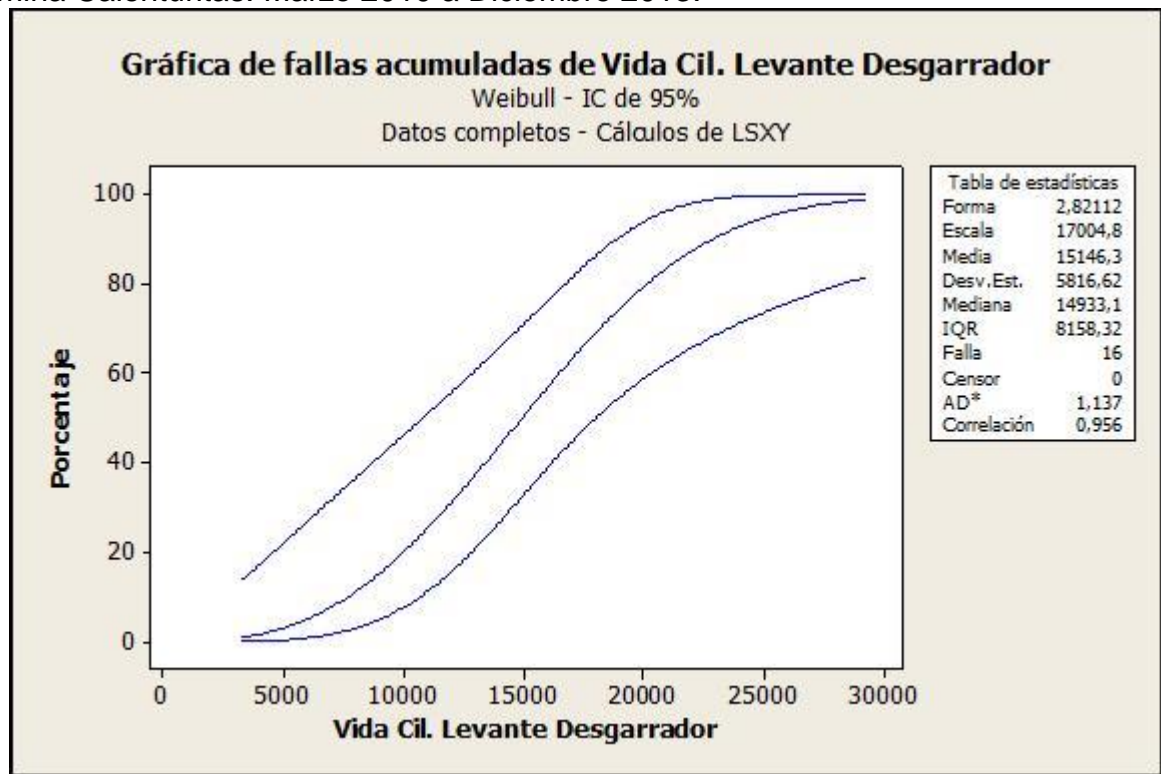
Fuente. El autor. Generada con Minitab.

En la figura 44, se grafica la supervivencia o confiabilidad de los cilindros de levante de ripper de tractores D10T de la mina Calenturitas en función de las horas acumuladas del componente. Se observa una confiabilidad del 98,3% para 4.000 horas. Cuando los componentes alcanzan las 10.000 horas, la confiabilidad se reduce al 79.9%. La supervivencia se reduce al 52,8% cuando los componentes alcanzan las 14.500 horas y solo el 12,6% de los cilindros superan las 22.000 horas. La confiabilidad de este componente cuando llega al horómetro objetivo de 6.000 horas es del 94,6%.

La figura 45, grafica la tasa de fallas de los cilindros de levante de ripper según sus horas acumuladas. A medida que aumentan las horas de componente, aumenta la tasa de fallas. El patrón de la gráfica es característico de la fase III de la curva de la bañera donde los componentes fallan por desgaste o envejecimiento y concuerda con el parámetro de forma obtenido β de $2,82 > 1$.

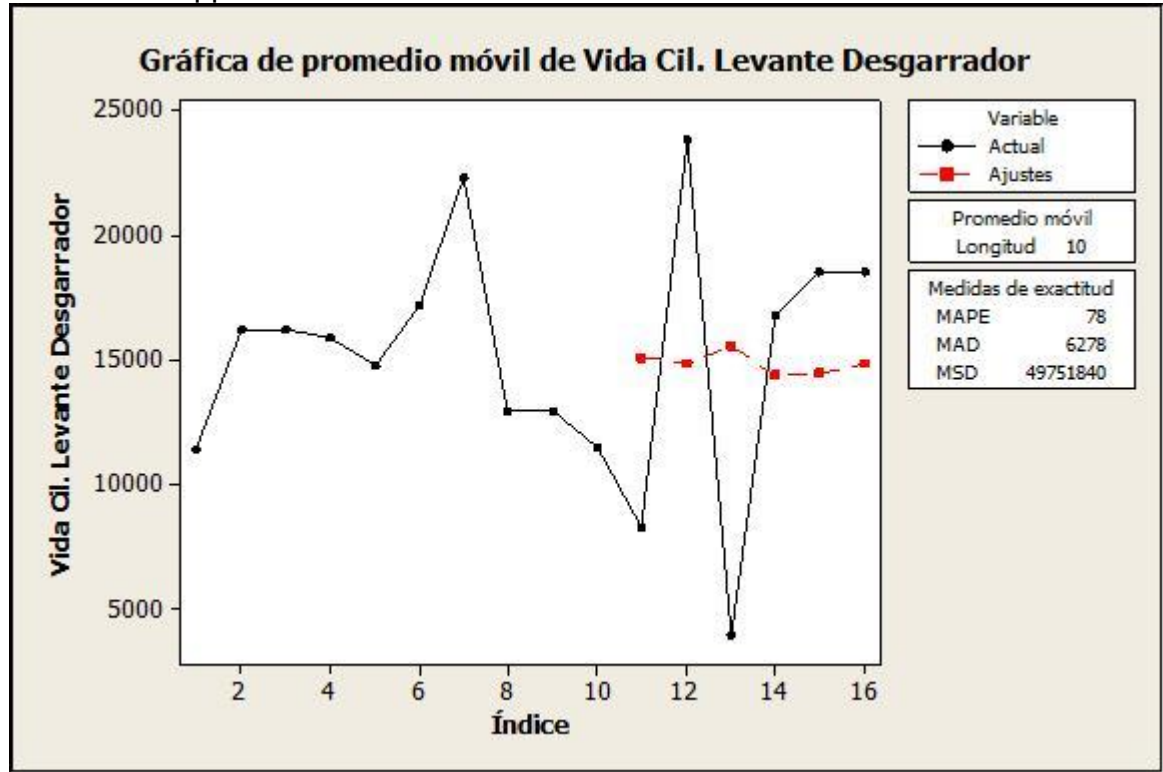
En la figura 46 se encuentra el promedio móvil de los últimos diez reemplazos. En esta gráfica se puede observar la tendencia de las horas con que se están reemplazando los cilindros de levante. Se observa una tendencia estable. Esto significa que la frecuencia de reemplazo de los cilindros de levante de ripper en promedio no ha variado en el tiempo. El valor pico del promedio móvil esta en 15.566 horas y el valor valle en 14.343 horas. Los valores promedio se deben incrementar en el futuro acercándose a 17.000 horas. El último valor promedio es 14.810 horas; 8.810 horas por encima del valor objetivo y 2.194 horas por debajo del parámetro de escala obtenido con la aplicación de Weibull.

Figura 45. Gráfica de tasa de fallas de Cilindros de Levante de Ripper D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

Figura 46. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Cilindros de Levante de Ripper D10T de la mina Calenturitas. Marzo 2010 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

3.11 ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE CILINDROS DE INCLINACION DE DESGARRADOR

La tabla 23 muestra los datos que fueron filtrados o removidos por considerarse no válidos por ser reemplazos motivados por contaminación. La tabla 23 muestra los datos válidos para reemplazo de cilindros de inclinación de desgarrador o ripper con los que se realizará el análisis.

Tabla 22. Detalle de los cilindros de inclinación de ripper reemplazados. Datos filtrados, no válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T395	CAMBIO CILINDRO INCLINACION RIPPER LH POR CONTAMINACION	25/01/2012	5.399	5.399
2	T395	CAMBIO CILINDRO INCLINACION RIPPER RH POR CONTAMINACION	25/01/2012	5.399	5.399

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

Tabla 23. Detalle de los cilindros de inclinación de ripper reemplazados. Datos válidos.

Cantidad	Equipo	Descripción Orden de Trabajo	Fecha	Horometro Equipo	Horometro Componente
1	T378	5356.LH.CC.00 RIPPER TILT CYLINDER	26/01/2011	15.869	15.869
2	T378	5356.RH.CC.00 RIPPER TILT CYLINDER	26/01/2011	15.869	15.869
3	T377	CAMBIO CILINDRO LH INCLINACION RIPPER	11/03/2012	23.421	23.421
4	T377	CAMBIO CILINDRO RH INCLINACION RIPPER	11/03/2012	23.421	23.421
5	T391	CAMBIO CILINDRO RH INCLINACION RIPPER	05/12/2012	22.270	22.270
6	T391	CAMBIO CILINDRO LH INCLINACION RIPPER	05/12/2012	22.270	22.270
7	T398	CAMBIO CILINDRO RH INCLINACION RIPPER	03/02/2013	13.442	13.442
8	T398	CAMBIO CILINDRO LH INCLINACION RIPPER	03/02/2013	13.442	13.442
9	T392	5356.RH.CC.00 RIPPER TILT CYLINDER	10/04/2013	23.787	23.787
10	T392	5356.LH.CC.00 RIPPER TILT CYLINDER	10/04/2013	23.787	23.787
11	T395	CAMBIO DE CILINDRO DE INCLINACION DEL RIPPER LADO LH	07/08/2013	15.145	15.145

Fuente. El autor. Información obtenida del Software AMT de Gecolsa Calenturitas.

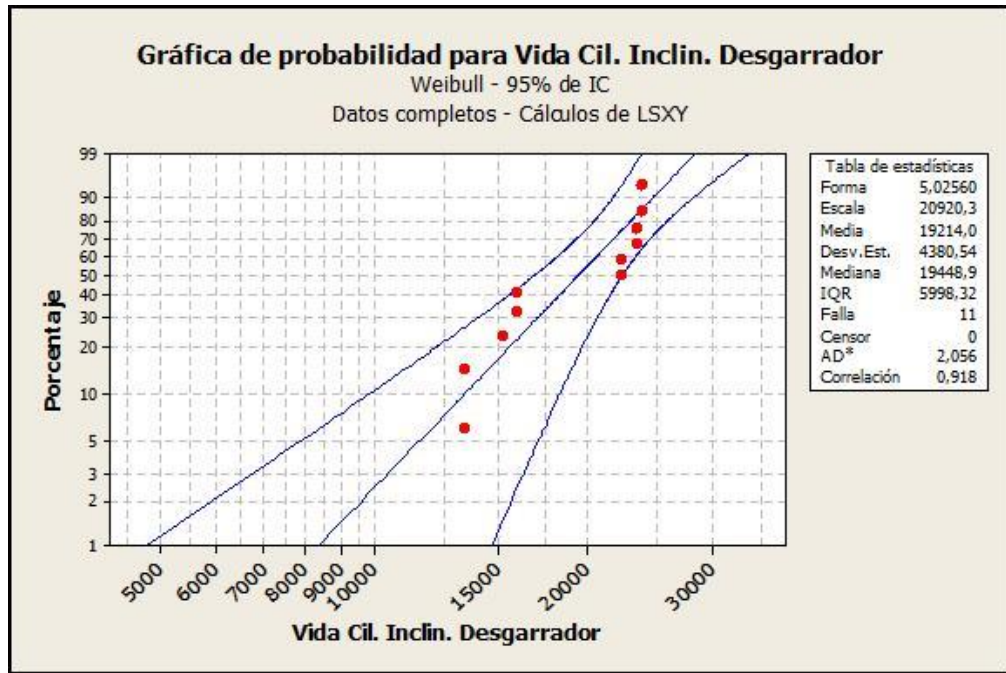
Los datos de horómetro componente correspondientes a las horas con que fueron removidos los componentes por falla, monitoreo de condiciones o por mantenimiento preventivo, se introducen en el software estadístico Minitab para su tratamiento y posterior análisis, arrojando las siguientes gráficas y resultados.

En la gráfica de la figura 47 cada punto identifica un evento de reemplazo de componente ya sea por falla, por condición o por que por las horas acumuladas se considera que ha llegado al final de su vida útil. En el eje Y se encuentra el porcentaje de probabilidad de falla para el componente específico cilindro de inclinación de ripper. Sin embargo el índice de correlación obtenido es de 0,918 cuando debería estar entre 0,95 y 1. Esto significa que los datos no están correctamente alineados para Weibull.

Para realizar análisis de vida de este componente usando Weibull se requieren más datos. Es necesario esperar a realizar más reemplazos de este componente para aplicar Weibull. Ya que la falla de uno de estos componentes no genera daños catastróficos y que esta normalmente no es súbita sino que se evidencia por fugas externas, es posible reemplazar estos componentes por condición. Sin embargo, la falla de más de dos de estos cilindros al mismo tiempo podría dejar tractores fuera de servicio. Por ello es prudente hacer una recomendación de vida de componente distinta a la inicial que se encuentra muy baja; en 6.000 horas.

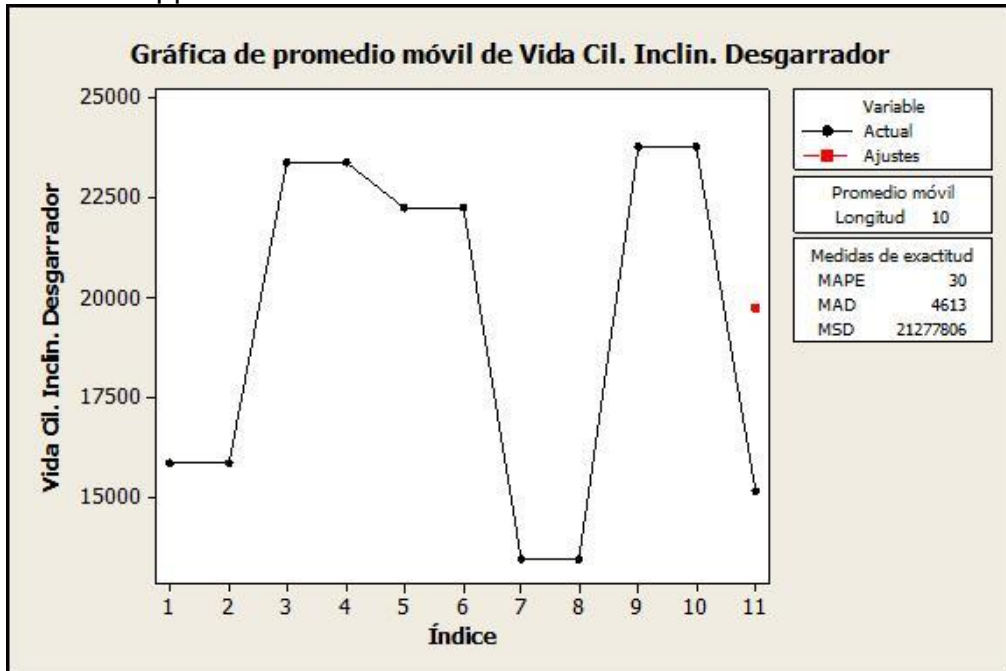
La figura 48 muestra el único dato existente para promedio móvil de los últimos 10 reemplazos que se encuentra en 19.757 horas. Incluyendo en el promedio el dato del primer reemplazo baja a 19.338 según la tabla 5. Por lo tanto se recomienda un valor conservador de vida útil de 19.000 horas o por condición hasta que se realicen los reemplazos suficientes que permitan alineación de los datos para Weibull.

Figura 47. Gráfica de no confiabilidad o probabilidad de falla Weibull para cilindros de inclinación de ripper de D10T de la mina Calenturitas. Enero 2011 - Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

Figura 48. Gráfica de promedio móvil últimos diez reemplazos para Cilindros de Inclinación de Ripper D10T de la mina Calenturitas. Enero 2011 a Diciembre 2013.



Fuente. El autor. Generada con Minitab.

3.12 RESUMEN DE ANALISIS DE DATOS DE VIDA DE COMPONENTES DE TRACTORES D10T MINA CALENTURITAS.

La tabla 24 resume los datos de vida de componentes reales obtenidos usando Weibull y las recomendaciones para modificar las horas estimadas de vida de los componentes en la planeación futura del proyecto.

Tabla 24. Tabla resumen de resultados.

Tabla Resumen Resultados Usando Weibull Para D10T				
Componente	Proyección Actual de Vida Útil	Vida Útil Usando Weibull	Media Móvil Últimos 10 Cambios	Proyección de Vida Útil Recomendada
Motor	12000	10953	10406	11000
Convertidor	12000	13558	12305	13500
Transmisión	12000	12886	11405	13000
Mando Final	12000	12924	13197	13000
Radiador	12000	12588	9748	12500
Cilindro Levante Dozer	6000	12194	12339	12000
Cilindro Inclinación Dozer	6000	13844	14312	14000
Cilindro Levante Ripper	6000	17004	14810	17000
Cilindro Inclinación Ripper	6000	No Válido	19757	19000

Fuente. El autor.

3.13 SIMULACION Y COMPARACIÓN

Para simular el impacto del cambio de frecuencia de reemplazo de componentes, modificando las vidas estimadas actuales a las recomendadas según los resultados del análisis con Weibull, se obtuvieron los datos de horas de equipos y componentes actuales, (horómetros del 19 de Marzo de 2014) y se proyectaron los cambios faltantes hasta la salida de contrato de los equipos. Aquí se recuerda que cada equipo sale de contrato cuando alcanza las 42.000 horas. Por lo tanto se desea comparar la cantidad de componentes necesarios usando los valores calculados originalmente al inicio del contrato, con los necesarios si se siguen las recomendaciones para vida útil de la tabla 24.

En la tabla 25 se resumen los resultados de la comparación propuesta. Las tablas 25 a 38 muestran el detalle de la simulación realizada para cada componente.

Tabla 25. Resumen de simulación de proyección de componentes necesarios hasta fin de contrato de la flota D10T

Tabla Resumen Simulación Cambio de Frecuencia de Reemplazos Componentes D10T					
Componente	Proyección Actual de Vida Útil	Componentes Necesarios Hasta Fin de Contrato	Proyección de Vida Útil Recomendada	Componentes Necesarios Hasta Fin de Contrato	Balance
Motor	12000	15	11000	15	Igual
Convertidor	12000	15	13500	11	Menos 4
Transmisión	12000	16	13000	15	Menos 1
Mando Final	12000	27	13000	26	Menos 1
Radiador	12000	13	12500	13	Igual
Cilindro Levante Dozer	6000	56	12000	23	Menos 33
Cilindro Inclinación Dozer	6000	59	14000	19	Menos 40
Cilindro Levante Ripper	6000	53	17000	19	Menos 34
Cilindro Inclinación Ripper	6000	56	19000	20	Menos 36

Fuente. El autor

Para el motor no se observan cambios en el número de cambios faltantes a pesar que la recomendación está 1.000 horas por debajo de la proyección actual. Este dato es importante si se tiene en cuenta que el motor es el componente que más peso tiene en los costos de mantenimiento del equipo. La recomendación se mantiene puesto que habrá menos riesgo, menor probabilidad de falla y mayor confiabilidad realizando los reemplazos a las 11.000 horas que a las 12.000. Para este componente es necesario realizar un análisis de modos de falla y monitoreo de condiciones para mejorar la confiabilidad y reducir su frecuencia de reemplazo incrementando las horas de vida útil con acciones de mantenimiento predictivo y preventivo.

Para el radiador tampoco se observan cambios en el número de reemplazos futuros. Para este componente la recomendación principal es realizar los cambios a las 12.500. En la tabla 25 y figura 34 se observa que la frecuencia de cambio de estos componentes ha venido aumentando. El último valor de promedio móvil es de 9.748 horas que esta 2.752 horas por debajo del valor recomendado.

Los componentes del tren de potencia muestran una reducción en el número de reemplazos futuros de menos uno para transmisión y mando final y de menos cuatro para convertidor de par. Estas reducciones aunque parecen bajas son importantes por el costo de reparación de estos componentes.

Para los cilindros la reducción es bien importante con variaciones desde menos treinta y tres hasta menos cuarenta. Se esperaba una gran variación porque actualmente los cilindros se vienen reemplazando principalmente por condición

puesto que la falla de uno de estos ítems no genera una condición crítica o de riesgo en el equipo. Sin embargo, por rotación de componentes en reparación es conveniente reemplazarlos en la frecuencia recomendada y evitar la no disponibilidad de estos componentes de repuesto en la mina. Igualmente, respetando estos intervalos se mantiene un nivel de confiabilidad justos para los componentes y los equipos.

La reducción de la frecuencia de reemplazos a los valores propuestos tiene un impacto directo en la reducción de costos del contrato que actualmente se encuentra vigente sin un aumento en el riesgo puesto que la vida de componentes hallada usando Weibull, se considera real. Esto siempre y cuando se realicen los mantenimientos adecuados en términos de frecuencia y calidad técnica de los mismos.

Para futuros tractores D10T entrando a contrato, la ganancia puede ser mayor si se manejan los intervalos de reemplazo de componentes propuestos desde el inicio de operaciones cuando el equipo tiene cero horas.

Tabla 26. Simulación y comparación de reemplazos de motor futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos de Motor Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	2950	12000	11000	5398	0	8348	0	8348
2	T378	34552	7225	12000	11000	7448	1	2673	1	3673
3	T379	Equipo Fuera de Contrato								
4	T380	34273	4839	12000	11000	7727	1	566	1	1566
5	T381	34011	4709	12000	11000	7989	1	698	1	1698
6	T391	30730	1941	12000	11000	11270	1	1211	1	2211
7	T392	29755	5968	12000	11000	12245	1	6213	1	7213
8	T393	19294	7693	12000	11000	22706	2	6399	2	8399
9	T395	19220	4075	12000	11000	22780	2	2855	2	4855
10	T396	20497	4951	12000	11000	21503	2	2454	2	4454
11	T397	18011	5585	12000	11000	23989	2	5574	2	7574
12	T398	20845	7402	12000	11000	21155	2	4557	2	6557
TOTAL							15	TOTAL	15	

Fuente. El autor.

Tabla 27. Simulación y comparación de reemplazos de convertidor futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos de Convertidor Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	2950	12000	13500	5398	0	8348	0	8348
2	T378	34552	7225	12000	13500	7448	1	2673	1	1173
3	T380	34273	4839	12000	13500	7727	1	566	0	12566
4	T381	34011	9686	12000	13500	7989	1	5675	1	4175
5	T391	30730	1941	12000	13500	11270	1	1211	0	13211
6	T392	29755	6528	12000	13500	12245	1	6773	1	5273
7	T393	19294	9914	12000	13500	22706	2	8620	2	5620
8	T395	19220	4075	12000	13500	22780	2	2855	1	13355
9	T396	20497	4951	12000	13500	21503	2	2454	1	12954
10	T397	18011	5585	12000	13500	23989	2	5574	2	2574
11	T398	20845	7402	12000	13500	21155	2	4557	2	1557
						TOTAL	15	TOTAL	11	

Fuente. El autor.

Tabla 28. Simulación y comparación de reemplazos de transmisión futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos de Transmisión Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	10590	12000	13000	5398	1	3988	1	2988
2	T378	34552	7225	12000	13000	7448	1	2673	1	1673
3	T380	34273	8122	12000	13000	7727	1	3849	1	2849
4	T381	34011	4709	12000	13000	7989	1	698	0	12698
5	T391	30730	4507	12000	13000	11270	1	3777	1	2777
6	T392	29755	6528	12000	13000	12245	1	6773	1	5773
7	T393	19294	8875	12000	13000	22706	2	7581	2	5581
8	T395	19220	5007	12000	13000	22780	2	3787	2	1787
9	T396	20497	4951	12000	13000	21503	2	2454	2	454
10	T397	18011	9383	12000	13000	23989	2	9372	2	7372
11	T398	20845	7402	12000	13000	21155	2	4557	2	2557
						TOTAL	16	TOTAL	15	

Fuente. El autor.

Tabla 29. Simulación y comparación de reemplazos de mandos finales LH futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos de Mando Final LH Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	10590	12000	13000	5398	1	3988	1	2988
2	T378	34552	13053	12000	13000	7448	1	7448	1	7448
3	T380	34273	8557	12000	13000	7727	1	4284	1	3284
4	T381	34011	4709	12000	13000	7989	1	698	0	12698
5	T391	30730	1941	12000	13000	11270	1	1211	1	211
6	T392	29755	2592	12000	13000	12245	1	2837	1	1837
7	T393	19294	8626	12000	13000	22706	2	7332	2	5332
8	T395	19220	13493	12000	13000	22780	2	10780	2	9780
9	T396	20497	6908	12000	13000	21503	2	4411	2	2411
10	T397	18011	6219	12000	13000	23989	2	6208	2	4208
11	T398	20845	846	12000	13000	21155	1	10001	1	9001
						TOTAL	15	TOTAL	14	

Fuente. El autor.

Tabla 30. Simulación y comparación de reemplazos de mandos finales RH futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos de Mando Final RH Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	10590	12000	13000	5398	1	3988	1	2988
2	T378	34552	133	12000	13000	7448	0	7581	0	7581
3	T380	34273	9294	12000	13000	7727	1	5021	1	4021
4	T381	34011	3695	12000	13000	7989	0	11684	0	11684
5	T391	30730	606	12000	13000	11270	0	11876	0	11876
6	T392	29755	2592	12000	13000	12245	1	2837	1	1837
7	T393	19294	8591	12000	13000	22706	2	7297	2	5297
8	T395	19220	4075	12000	13000	22780	2	2855	2	855
9	T396	20497	6908	12000	13000	21503	2	4411	2	2411
10	T397	18011	6219	12000	13000	23989	2	6208	2	4208
11	T398	20845	846	12000	13000	21155	1	10001	1	9001
						TOTAL	12	TOTAL	12	

Fuente. El autor.

Tabla 31. Simulación y comparación de reemplazos de Radiadores futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos de Radidor Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	2950	12000	12500	5398	0	8348	0	8348
2	T378	34552	1250	12000	12500	7448	0	8698	0	8698
3	T380	34273	4839	12000	12500	7727	1	566	1	66
4	T381	34011	4709	12000	12500	7989	1	698	1	198
5	T391	30730	4507	12000	12500	11270	1	3777	1	3277
6	T392	29755	6528	12000	12500	12245	1	6773	1	6273
7	T393	19294	7693	12000	12500	22706	2	6399	2	5399
8	T395	19220	10151	12000	12500	22780	2	8931	2	7931
9	T396	20497	9616	12000	12500	21503	2	7119	2	6119
10	T397	18011	5585	12000	12500	23989	2	5574	2	4574
11	T398	20845	846	12000	12500	21155	1	10001	1	9501
						TOTAL	13	TOTAL	13	

Fuente. El autor.

Tabla 32. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Levante de Dozer Izquierdos futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos Cilindro de Levante de Dozer LH Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	624	6000	12000	5398	1	22	0	6022
2	T378	34552	133	6000	12000	7448	1	1581	0	7581
3	T380	34273	767	6000	12000	7727	1	2494	0	8494
4	T381	34011	4895	6000	12000	7989	2	884	1	884
5	T391	30730	6408	6000	12000	11270	2	5270	1	5678
6	T392	29755	6966	6000	12000	12245	3	245	1	7211
7	T393	19294	5992	6000	12000	22706	4	4698	2	4698
8	T395	19220	2442	6000	12000	22780	4	1222	2	1222
9	T396	20497	20	6000	12000	21503	3	3523	1	9523
10	T397	18011	944	6000	12000	23989	4	933	2	933
11	T398	20845	4076	6000	12000	21155	4	1231	2	1231
TOTAL							29	TOTAL	12	

Fuente. El autor.

Tabla 33. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Levante de Dozer Derechos futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos Cilindro de Levante de Dozer RH Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	2747	6000	12000	5398	1	2145	0	8145
2	T378	34552	1602	6000	12000	7448	1	3050	0	9050
3	T380	34273	512	6000	12000	7727	1	2239	0	8239
4	T381	34011	40	6000	12000	7989	1	2029	0	8029
5	T391	30730	8460	6000	12000	11270	2	5270	1	7730
6	T392	29755	4461	6000	12000	12245	2	4706	1	4706
7	T393	19294	1173	6000	12000	22706	3	5879	1	11879
8	T395	19220	5021	6000	12000	22780	4	3801	2	3801
9	T396	20497	8938	6000	12000	21503	4	3503	2	6441
10	T397	18011	5585	6000	12000	23989	4	5574	2	5574
11	T398	20845	4750	6000	12000	21155	4	1905	2	1905
TOTAL							27	TOTAL		11

Fuente. El autor.

Tabla 34. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Inclinación de Dozer Izquierdos futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos Cilindro de Inclinación de Dozer LH Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	8908	6000	14000	5398	1	5398	1	306
2	T378	34552	4868	6000	14000	7448	2	316	0	12316
3	T380	34273	512	6000	14000	7727	1	2239	0	8239
4	T381	34011	14020	6000	14000	7989	2	1989	1	7989
5	T391	30730	9804	6000	14000	11270	2	5270	1	7074
6	T392	29755	6966	6000	14000	12245	3	245	1	5211
7	T393	19294	357	6000	14000	22706	3	5063	1	9063
8	T395	19220	13821	6000	14000	22780	4	4780	2	8601
9	T396	20497	4951	6000	14000	21503	4	2454	1	12454
10	T397	18011	2628	6000	14000	23989	4	2617	1	12617
11	T398	20845	846	6000	14000	21155	3	4001	1	8001
						TOTAL	29	TOTAL	10	

Fuente. El autor.

Tabla 35. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Inclinación de Dozer Derechos futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos Cilindro de Inclinación de Dozer RH Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	1885	6000	14000	5398	1	1283	0	7283
2	T378	34552	5633	6000	14000	7448	2	1081	0	13081
3	T380	34273	1115	6000	14000	7727	1	2842	0	8842
4	T381	34011	7854	6000	14000	7989	2	1989	1	1843
5	T391	30730	1181	6000	14000	11270	2	451	0	12451
6	T392	29755	14629	6000	14000	12245	3	245	1	12245
7	T393	19294	894	6000	14000	22706	3	5600	1	9600
8	T395	19220	13821	6000	14000	22780	4	4780	2	8601
9	T396	20497	3427	6000	14000	21503	4	930	1	10930
10	T397	18011	2628	6000	14000	23989	4	2617	1	12617
11	T398	20845	7402	6000	14000	21155	4	3155	2	557
TOTAL							30	TOTAL		9

Fuente. El autor.

Tabla 36. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Levante de Ripper Izquierdos futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos Cilindros de Levante de Ripper LH Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	1885	6000	17000	5398	1	1283	0	7283
2	T378	34552	18683	6000	17000	7448	2	1448	1	7448
3	T380	34273	ESTE TRACTOR NO TIENE DESGARRADOR							
4	T381	34011	ESTE TRACTOR NO TIENE DESGARRADOR							
5	T391	30730	13558	6000	17000	11270	2	5270	1	7828
6	T392	29755	1270	6000	17000	12245	2	1515	0	13515
7	T393	19294	390	6000	17000	22706	3	5096	1	6096
8	T395	19220	13821	6000	17000	22780	4	4780	2	2601
9	T396	20497	20497	6000	17000	21503	4	3503	2	4503
10	T397	18011	6522	6000	17000	23989	4	5989	1	13511
11	T398	20845	7944	6000	17000	21155	4	3155	1	12099
TOTAL							26	TOTAL	9	

Fuente. El autor.

Tabla 37. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Inclinación de Ripper Izquierdos futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos Cilindros de Inclinación de Ripper LH Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	13181	6000	19000	5398	1	5398	0	18579
2	T378	34552	18683	6000	19000	7448	2	1448	1	7131
3	T380	34273	ESTE TRACTOR NO TIENE DESGARRADOR							
4	T381	34011	ESTE TRACTOR NO TIENE DESGARRADOR							
5	T391	30730	8460	6000	19000	11270	2	5270	1	730
6	T392	29755	5968	6000	19000	12245	3	213	0	18213
7	T393	19294	19294	6000	19000	22706	4	4706	2	3706
8	T395	19220	4075	6000	19000	22780	4	2855	1	7855
9	T396	20497	20497	6000	19000	21503	4	3503	2	2503
10	T397	18011	18011	6000	19000	23989	4	5989	2	4000
11	T398	20845	7402	6000	19000	21155	4	3155	1	9557
TOTAL							28	TOTAL		10

Fuente. El autor.

Tabla 38. Simulación y comparación de reemplazos de Cilindros de Inclinación de Ripper Derechos futuros hasta fin de contrato.

Proyección Reemplazos Cilindros de Inclinación de Ripper RH Hasta Fin de Contrato										
Cant.	Equipo	Horometro Actual Equipo	Horometro Actual Componente	Vida Actual	Vida Recomendada	Horas Para Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Actual	Horometro Componente Salida de Contrato	Componentes Para Salida de Contrato Recomendado	Horometro Componente Salida de Contrato
1	T377	36602	13181	6000	19000	5398	1	5398	0	18579
2	T378	34552	18683	6000	19000	7448	2	1448	1	7131
3	T380	34273	ESTE TRACTOR NO TIENE DESGARRADOR							
4	T381	34011	ESTE TRACTOR NO TIENE DESGARRADOR							
5	T391	30730	8460	6000	19000	11270	2	5270	1	730
6	T392	29755	5968	6000	19000	12245	3	213	0	18213
7	T393	19294	19294	6000	19000	22706	4	4706	2	3706
8	T395	19220	13.821	6000	19000	22780	4	4780	1	17601
9	T396	20497	20497	6000	19000	21503	4	3503	2	2503
10	T397	18011	18011	6000	19000	23989	4	5989	2	4000
11	T398	20845	7402	6000	19000	21155	4	3155	1	9557
TOTAL							28	TOTAL		10

Fuente. El autor.

4. CONCLUSIONES

El uso de la distribución de probabilidad de Weibull en el análisis de vida de componentes junto con información histórica de reemplazo de componentes por falla por desgaste o envejecimiento, condición o rutina de mantenimiento, permite definir ciclos de vida reales de aplicaciones específicas utilizando una metodología sistémica y aplicable a diversos componentes y equipos.

En la presente monografía se siguió un método para definir ciclos de vida óptimos de componentes utilizando software estadístico y datos históricos de reemplazo de componentes de 5,6 años de una población de doce tractores Caterpillar D10T de la mina Calenturitas perteneciente a Prodeco. Estos ciclos de vida definidos se pueden utilizar para la proyección adecuada del reemplazo de componentes futuros con un correcto balanceo entre confiabilidad, riesgo o probabilidad de falla, y los costos asociados a la operación de mantenimiento. También pueden ser utilizados para la proyección de reemplazo de componentes de futuros tractores D10T entrando a operación a la misma mina.

La información obtenida y la metodología aplicada pretenden convertirse en una entrada para la administración de contrato de mantenimiento que se encuentra en plena vigencia, con el ánimo de asegurar un balance correcto entre las inversiones que se realizan a los equipos y el retorno que se obtiene por disponibilidad, confiabilidad y uso de los mismos por parte del cliente. Esto se puede lograr si se realiza el mismo ejercicio en el resto de flotas que administra el contrato.

Algo muy importante de este método es que se puede replicar para cualquier flota de equipos de una operación específica donde se quiera utilizar los datos históricos para realizar proyecciones futuras. El método permite incluso definir ciclos de vida para probabilidades de falla y niveles de confiabilidad concretos definidos por el cliente o la operación de mantenimiento dependiendo de la industria donde se está aplicando y las tasas de falla permitidas en cada aplicación.

Si los datos lo permiten, y se tienen bien documentados los modos de falla de cada componente removido, el método se puede aplicar a modos de falla independientes, obteniendo curvas de probabilidad de falla para cada modo de falla. Este conocimiento permite definir ciclos de vida de subcomponentes que reemplazados o mantenidos a tiempo pueden evitar la falla del sistema al que pertenecen.

Se cumplió con el objetivo general y los objetivos específicos planteados en el plan de monografía; logrando la determinación de intervalos de reemplazo de componentes óptimos para la flota de tractores D10T de la mina Calenturitas utilizando los datos históricos, Weibull y software estadístico Minitab.

En cuanto a los resultados obtenidos para la vida real de motores de D10T, es necesario revisar los análisis de falla de todos los motores fallados para determinar por medio de pareto los subcomponentes de los motores que más fallas presentan y los modos de falla que desencadenan las fallas y posterior remoción de estos componentes. De esta forma se podrán plantear acciones o tareas de mantenimiento predictivo o preventivo que logren incrementar la vida media de los motores de estos equipos.

BIBLIOGRAFIA

ABERNETHY, Robert. The new weibull handbook, Fifth Edition. Distributed by Paul Barringer, <http://www.barringer1.com>. Diciembre 2006.

BARRINGER, Paul. Life Cycle Cost and Weibull go together like PB&J. Barringer & Associates, Inc. 2007. Disponible en Internet <http://www.barringer1.com>.

CATERPILLAR, Global Service Learning, Technical Presentation, D10T Track Type Tractor, Media Number SERV1816, Marzo 2006

CATERPILLAR, Performance Handbook, Edition 37. Caterpillar Inc., Peoria, Illinois, U.S.A., 2007.

CATERPILLAR, Service Manual D10T Track Type Tractor, System Operation, Media Number RENR7547, Caterpillar Inc., Peoria, Illinois, U.S.A. Octubre 2006.

CATERPILLAR, Technical Sales Presentation, CAT D10T Large Dozer, 2013. Disponible en <https://mining.cat.com/sales/tsp>

DIAZ MATALOBOS, Angel. Confiabilidad en mantenimiento. Caracas: Ediciones IESA 1992.

FORCADAS FELIU, Jorge. Estadística aplicada a los sistemas y confiabilidad en los sistemas. Estadística en los sistemas de confiabilidad. Medellín, Colombia: SAI, Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos.

GONZALEZ JAIMES, Isnardo. Seminario I: Profundización bibliográfica. En: Especialización en Gerencia en Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2013.

JARAMILLO, Julian. Mantenimiento Predictivo: Filosofía, gestión tecnológica y teoría de la predicción. En: Especialización en Gerencia en Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga Agosto 2012.

Mc NEW, Rusty. Using weibull to determine optimal component life cycle analysis. Dealer best practices series. Caterpillar, Pioria U.S.A. Junio 2011.

MONTERO TRESPALACIOS, Alex Ivan. Análisis de confiabilidad a las unidades de bombeo mecánico de Campo Jazmín perteneciente a Mansarovar Energy Colombia LTD mediante la utilización de distribuciones estadísticas. UIS Monografía de grado 2013.

MORA GUTIERREZ, Alberto. Mantenimiento. Planeación, ejecución y control. Primera edición. Alfaomega grupo editor, Mexico, Septiembre 2009.

MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en la confiabilidad. Mexico: Aladon, 2004.

O'CONNOR, Patrick. Practical Reliability Engineering. Stevenage: Wiley – John Wiley and Son. Cuarta edición 2002.

ROJAS ARIAS, Jaime. Introducción a la confiabilidad. Bogotá, Universidad de los Andes 1975.