

Pruebas de Vida Acelerada: Una aplicación a sellos neumáticos de pistón utilizando la relación Log-Lineal General con tres estreses

Iván de Jesús García Garrobo¹, Manuel Iván Rodríguez Borbon¹, Ángel Peralta Meza¹,
Patricia Cristina Parroquín Amaya¹ y Víctor Mauricio Estrada Ruiz¹

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Resumen

El sello es una refacción imprescindible de los cilindros neumáticos y ampliamente utilizada en la automatización de la producción de cualquier sector industrial. El sello en el pistón en un cilindro neumático produce energía que permite el movimiento de equipos y herramientas en un proceso donde se sujetan, elevan, arrastran, bajan y transportan objetos, etc. Se realizaron Pruebas de Vida Acelerada (ALT, por sus siglas en inglés Accelerated Life Testing) a sellos neumáticos de pistón elaborados a base de poliuretano, un producto nuevo que lanzará al mercado la empresa Tracto Partes Agrícolas. Las pruebas se realizaron principalmente con el fin de conocer la vida media de este producto que aún se encuentra en la fase de prueba, así como establecer políticas de garantía que permitan a la compañía ofrecer al cliente un producto confiable. Para la prueba se corrió un diseño de experimentos factorial completo utilizando tres variables de estrés (temperatura, presión y velocidad de carrera) a tres niveles, en el que se utilizó el modelo de relación multivariable Log-Lineal General (GLL) para una distribución subyacente Lognormal. Para la estimación se utilizó el software ALTA de la compañía ReliaSoft, el cual trabaja la relación vida-esfuerzo GLL para un máximo de ocho estreses.

Palabras clave: Pruebas de vida acelerada, Relación Log-Lineal General, Sellos neumáticos, DOE en Pruebas de Vida Acelerada

Introducción

Los fabricantes de hoy se enfrentan a una fuerte presión para desarrollar nuevos productos de tecnología superior en un tiempo récord, al tiempo que mejoran la productividad, la confiabilidad del producto, y la calidad general. Los requisitos para una mayor confiabilidad han aumentado la necesidad de realizar por adelantado ensayo de materiales, componentes y sistemas. Las expectativas de los clientes son cada vez más altas, demandan mayor confiabilidad y la necesidad de un rápido desarrollo de productos (Meeker & Escobar, 1998).

Hoy en día, el término confiabilidad es parte de nuestro lenguaje cotidiano, sobre todo cuando se habla acerca de la funcionalidad de un producto. La definición técnica para la confiabilidad difiere sólo ligeramente ampliando esta definición común a la de probabilidad: la confiabilidad es la probabilidad de que un producto no falle bajo condiciones ambientales y funcionales dadas durante un período de tiempo definido (The Association of German Engineers (VDI), 2006).

Elsayed & Zhang (2007) definen las ALT como una alternativa comúnmente utilizada

para obtener información de tiempos de fallo rápidamente bajo altos niveles de estrés con el fin de predecir el rendimiento de vida del producto bajo condiciones de estrés de diseño, es decir, se realizan con el objetivo de someter a los productos a altos niveles de una o más variables de aceleración o de esfuerzo (como pueden ser temperatura, voltaje o presión) para obtener datos rápidamente, los cuales son modelados y analizados para proporcionar información que permita estimar la vida de un producto bajo condiciones normales de uso.

Este artículo presenta los resultados de una investigación llevada a cabo en la empresa Tracto Partes agrícolas en la cual se realizaron Pruebas de Vida Acelerada a sellos neumáticos de pistón, un producto nuevo fabricado a base de poliuretano, el cual obtenido en el área de Ingeniería de Diseño y Materiales de la misma empresa.

En los últimos diez años, en México se ha generado un incremento en la automatización de procesos industriales, por ello la demanda de los sellos se ha incrementado considerablemente, esto debido a que la neumática tiene una mayor presencia en el campo de la automatización, sobre todo en la sustitución de la mano del hombre en áreas donde los trabajos son repetitivos. La neumática es importante en un gran número de aplicaciones, por ello se ha convertido en un elemento imprescindible en la automatización de la producción de cualquier sector industrial como lo es la Industria alimenticia, textil, automotriz, agroindustrial, farmacéutica, construcción, calzado, química, minera, etc. Un sistema neumático produce energía que

permite el movimiento de equipos y herramientas en un proceso donde se sujetan, elevan, arrastran, bajan y transportan objetos, etc. Los sellos cubren la mayoría de aplicaciones que están vinculadas con maquinaria agrícola, maquinaria pesada, fabricación de productos alimenticios, farmacéuticos, cárnicos, lácteos, aseo y bebidas. Estos sistemas los encontramos en una gran variedad de máquinas como son grúas, tractores, retroexcavadoras, elevadores, prensas, cizallas y montacargas solo por mencionar algunos.

La empresa fabrica sellos a través de un proceso de maquinado en un torno de Control Numérico por Computadora (CNC). La materia prima que se utiliza para su fabricación son barras de poliuretano que en su mayoría son importadas, lo que incrementa los costos de producción y no le ha permitido ofrecer mejor precio a sus clientes, por ello en el afán de buscar reducir los costos de fabricación y ofrecer precios más bajos, la empresa pretende lanzar al mercado este producto nuevo, sellos elaborados a base de resina de poliuretano que la misma compañía produce.

El producto se encuentra en fase de prueba y ha sido ofrecido en promoción a sus clientes, aunque con muy poco éxito. Aún y cuando los sellos neumáticos son ofrecidos con garantía de reemplazo, los sellos comerciales son considerados por los clientes más confiables que los fabricados por la empresa. Sus clientes no desean correr riesgos. Si el equipo o maquinaria falla durante la producción se pueden generar grandes pérdidas monetarias para el cliente,

por ello la garantía de reemplazo no es suficiente.

En la empresa se fabrican sellos para diferentes compañías del sector minero, agrícola, alimentos y de construcción, los cuales exigen garantizar la vida o la calidad del producto a través del tiempo, exigencia que aún no puede satisfacer. Con la fabricación de barras de poliuretano, la empresa está en condiciones de ofrecer mejores precios, el problema es que el precio es irrelevante para el cliente y la exigencia de una garantía de vida aún no se le puede proporcionar debido a que la vida útil del producto se desconoce.

Sin duda, la estrategia de Tracto partes Agrícolas de producir las barras de poliuretano y maquinar con estos sellos hidráulicos, trae beneficios como la reducción de costos de producción, disminución del tiempo de respuesta a sus clientes y precios más bajos, sin embargo para incrementar las probabilidades de éxito, el lanzamiento de este nuevo producto debe ir acompañado de una garantía de vida, avalada por un estudio que dé certeza y confianza a sus clientes sobre la calidad y confiabilidad de los sellos.

La alta confiabilidad en un producto tiene un enorme impacto positivo en la satisfacción y la generación de confianza del cliente, por lo que la realización de pruebas de confiabilidad a los sellos hidráulicos es una buena alternativa para este tipo de producto que demanda una alta confiabilidad, esto sin duda ayudará a la empresa en el lanzamiento de su nuevo producto.

Un gran número de dispositivos necesitan ser probados durante un largo periodo de tiempo bajo condiciones normales de funcionamiento con el fin de obtener mediciones precisas. Un método comúnmente usado para estimar la confiabilidad de tales sistemas en un tiempo mucho más corto son las ALT (Balakrishnan, 2010).

El sello es un producto de larga vida, por ello la conveniencia de utilizar las ALT, estas proporcionarán información que le servirá a la compañía para determinar las características de vida de los sellos y establecer políticas de garantía que permitan generar la confianza en el producto y establecer condiciones que ayudarán en el lanzamiento de este producto y ampliar la cobertura de su mercado.

Método

2.1 Diseño la prueba

2.1.1 Unidades de prueba

Los especímenes a los que se les realizara las ALT son sellos de pistón neumáticos de poliuretano de perfil UNP, tal como se muestra en la Figura 2 y Figura 3.

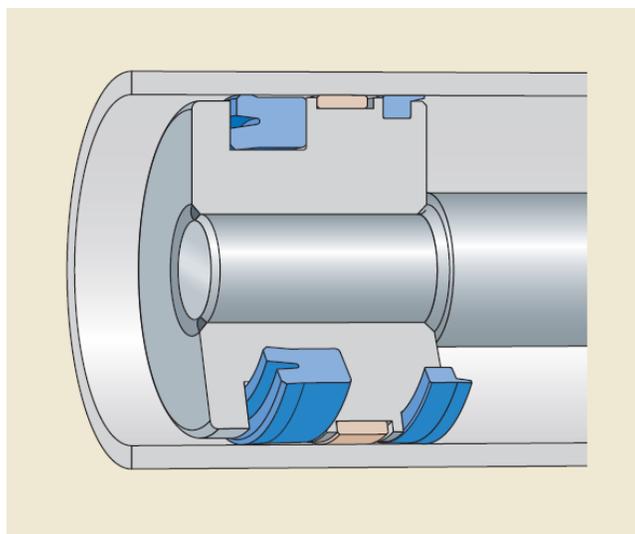


Figura 1. Sello de pistón con sello limpiador



Figura 2. Perfil UNP del sello neumático.

2.1.2 Selección las variables de estrés

En esta prueba, la vida de los sellos es medida bajo diferentes condiciones experimentales. Tres factores o variables de estrés son las que tienen un mayor efecto sobre la vida esperada de los sellos. Las variables de estrés utilizadas para la ALT

fueron: la temperatura de la cámara, presión en el cilindro y la velocidad de desplazamiento. Los rangos de trabajo de estas variables en condiciones de uso normal se conocen por anticipado y según su geometría descrita, las condiciones de operación se muestran en la Tabla 1.

Temperatura	Velocidad máxima	Presión de operación máxima
-30 a 80°C	≤ 1 m/s	174 psi

Tabla 1. Condiciones de operación del sello neumático

2.1.3 Determinación de los niveles de prueba

Para determinar los niveles de prueba, se toma como referencia la especificación GMW8287 de la compañía General Motors. Este estándar denominado Prueba de Vida Acelerada Calibrada (CALT, por sus siglas en inglés The Calibrated Accelerated Life Testing) es una metodología propuesta por Larry Edson que aprovecha el trabajo previo de Wayne Nelson, William Meeker, y Pantelis Vassiliou. Esta es especialmente adecuada para situaciones donde se requiere un alto nivel de confiabilidad (General Motors, 2011).

Siguiendo la especificación técnica se obtiene el

nivel más alto de estrés a aproximadamente un 10% menor a un límite exagerado, el nivel medio se obtiene con una reducción del 10% del límite más alto y para obtener el nivel más bajo se deberá balancear dos condiciones: Generar el nivel de estrés más bajo, que sea lo más cercano posible al nivel de estrés normal para minimizar el riesgo en la extrapolación y que sea lo más alto posible para reducir el tiempo de prueba y cumplir con los requisitos del calendario programado.

Variables de estrés	X_0	X_L	X_M	X_H
Temperatura	80	140	153	170
Velocidad	1	2.4	3.7	4.95
Presión	90	145	157	175

Tabla 2. Niveles por variable de estrés.

Las variables de estrés fueron probadas a tres niveles. La Tabla 2 se muestra el nivel de operación X_0 , el nivel bajo X_L , el nivel medio X_M y el nivel alto X_H de cada variable de estrés utilizada en la prueba.

2.1.4 Determinación del número de unidades de prueba

Se utilizó un diseño de experimentos factorial completo para la prueba, por lo que fue necesario utilizar 27 especímenes para prueba, (3x3x3) combinaciones de estrés. El

uso del diseño de experimentos en las pruebas de vida acelerada son una práctica que ha sido utilizada de manera exitosa en los últimos años. Autores como Mashhadi (1992), MoKinney (1993) Case (1998) y Monroe (2013) consideran que el uso combinado de estos métodos es muy ventajoso e incrementa la eficiencia de la prueba.

2.2 Recolección de datos

Para el estudio, las corridas se realizaron de manera aleatoria y se consideró la pérdida

de presión del cilindro como fallo del sello. Cabe señalar que dentro del cilindro, la distancia recorrida de un sello en un tiempo t se incrementa a medida que se incrementan las revoluciones del motor, dicho de otra manera, por ejemplo la distancia recorrida del sello en una hora hasta el fallo, es grande en velocidades altas y pequeña en velocidades bajas, por ello los tiempos de fallo fueron transformados a kilómetros. El registro de los tiempos y su transformación se muestra en la Tabla 3.

Orden	Temperatura	Presión	Velocidad	Tiempos hasta el fallo (segundos)	Recorrido del sello (kilómetros)
1	140	145	2.4	21528	29.09
2	140	145	3.7	17231	33.74
3	140	145	4.95	17713	52.03
4	140	157	2.4	20163	27.25
5	140	157	3.7	17602	34.47
6	140	157	4.95	14940	43.89
7	140	175	2.4	16205	21.90
8	140	175	3.7	10502	20.57
9	140	175	4.95	11415	33.53
10	153	145	2.4	7562	10.22
11	153	145	3.7	7958	15.58
12	153	145	4.95	8460	24.85
13	153	157	2.4	5224	7.06
14	153	157	3.7	4233	8.29
15	153	157	4.95	6079	17.86
16	153	175	2.4	3319	4.48

17	153	175	3.7	3524	6.90
18	153	175	4.95	1979	5.81
19	170	145	2.4	2111	2.85
20	170	145	3.7	916	1.79
21	170	145	4.95	580	1.70
22	170	157	2.4	1876	2.53
23	170	157	3.7	742	1.45
24	170	157	4.95	546	1.60
25	170	175	2.4	1619	2.19
26	170	175	3.7	779	1.53
27	170	175	4.95	782	2.30

Tabla 3. Datos obtenidos durante las corridas.

2.3 Selección de la distribución de vida.

Los resultados de la prueba de bondad y ajuste mostraron que la distribución de vida que se ajusta a los datos obtenidos es la distribución Lognormal. Como puede suponerse por el nombre, la distribución Lognormal tiene ciertas similitudes con la distribución normal. Una variable aleatoria está distribuida log normalmente si el logaritmo de la variable aleatoria se distribuye normalmente (ReliaSoft, 2014).

Matemáticamente la función de densidad de probabilidad (PDF) está dada por

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} st} \exp\left[-\frac{1}{2s^2} \left(\ln \frac{t}{t_{med}}\right)^2\right] \quad t \geq 0$$

Donde el parámetro s es un parámetro de forma y t_{med} el parámetro de localización es el tiempo mediano del fallo.

El tiempo medio hasta el fallo (MTTF) está dado por

$$MTTF = t_{med} \exp(s^2 / 2)$$

Debido a que el logaritmo es una función monótonamente creciente,

$$F(t) = Pr\{T \leq t\} = \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_{med}}\right)$$

Entonces

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_{med}}\right) \quad (1)$$

2.4 Selección del modelo de relación vida-esfuerzo

Debido a que la prueba consiste en múltiples estreses de aceleración como es el caso de los sellos neumáticos, es necesaria una relación multivariable general, por ello se eligió el modelo de relación vida-esfuerzo Log-Lineal General (GLL). Tal relación es la relación log-lineal general, describe una característica de vida como una función de un vector de n estreses o $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$. Matemáticamente la relación viene dada por:

$$L(X) = e^{\alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j x_j}$$

Donde: α_0 y α_j son los parámetros del modelo y X es un vector de n estreses.

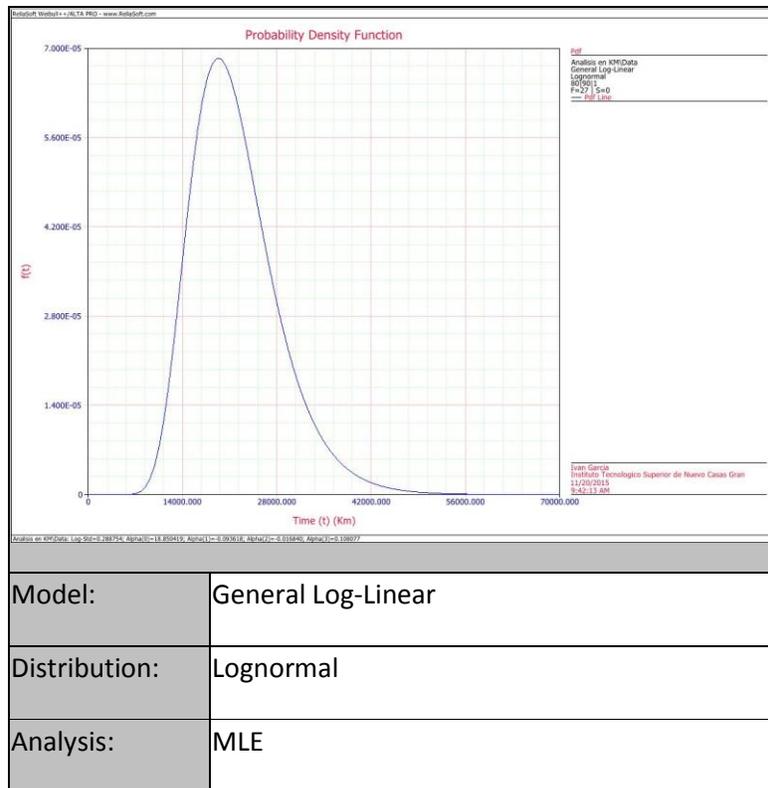
La PDF del modelo GLL-lognormal puede ser derivada asignando a la función de

densidad de probabilidad de la distribución Lognormal, $t_{med} = L(X)$.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} st} \exp \left[-\frac{1}{2s^2} \left(\ln \frac{t}{e^{\alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j x_j}} \right)^2 \right] \quad t \geq 0 \quad (6)$$

2.5 Estimación de parámetros

Para la estimación se utilizó el software ALTA de la compañía ReliaSoft, sin embargo, se presentan también los cálculos para una mejor comprensión del análisis. Los parámetros obtenidos para la distribución de vida subyacente se muestran en la Tabla 4, los cuales fueron obtenidos a través del método de estimación de máxima verosimilitud.



Log-Std	0.288754
Alpha(0) (Km)	18.850419
Alpha(1)	-0.093618
Alpha(2)	-0.01684
Alpha(3)	0.108077
Mean (Km)	9.953474
LK Value	-62.082491
Fail \ Susp	27 \ 0

Tabla 4. PDF y parámetros estimados en ALTA.

2.5 Caracterización

Una vez obtenidos los parámetros $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ se tiene que

$$L(X) = e^{\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3}$$

$$= e^{18.850419 - 0.0936618x_1 - 0.016840x_2 + 0.108077x_3}$$

Donde x_1, x_2, x_3 representan las variables de estrés: temperatura, presión y velocidad respectivamente, así para las condiciones de uso normal $x_1 = 80, x_2 = 90$ y $x_3 = 1$ se obtiene el tiempo mediano del fallo.

$$L(X)$$

$$= e^{18.850419 - 0.0936618(80) - 0.016840(90) + 0.108077(1)}$$

$$= 21,025.13 \text{ km.}$$

Con el parámetro s estimado (véase la Tabla 4) y a partir de la ecuación 2 calculamos el tiempo medio de fallo de los sellos.

$$MTTF = t_{med} \exp\left(\frac{s^2}{2}\right)$$

$$= (21,025)e^{\frac{(0.288754)^2}{2}}$$

$$= 21,920 \text{ km.}$$

User Input	
Temperature =	80
Pressure =	90
Speed =	1
ALTA Output	

Mean Life =	21920.196719 Km
-------------	-----------------

Tabla 5. Resultado de la vida media en ALTA.

La figura 8 muestra el grafico de la confiabilidad respecto al tiempo para los sellos neumáticos. Para calcular la confiabilidad a una determinada misión utilizamos la ecuación 4 y para $t = 21,920$ la confiabilidad es

$$R(21920) = 1 - \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{L(X)}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{1}{0.288754} \ln \frac{21920}{21025}\right) = 0.44$$

User Input	
Temperature =	80
Pressure =	90
Speed =	1
Mission End Time (Km) =	21920
ALTA Output	
R(t=21920) =	0.442614

Tabla 6. Confiabilidad para una misión de 21,920 km en ALTA.

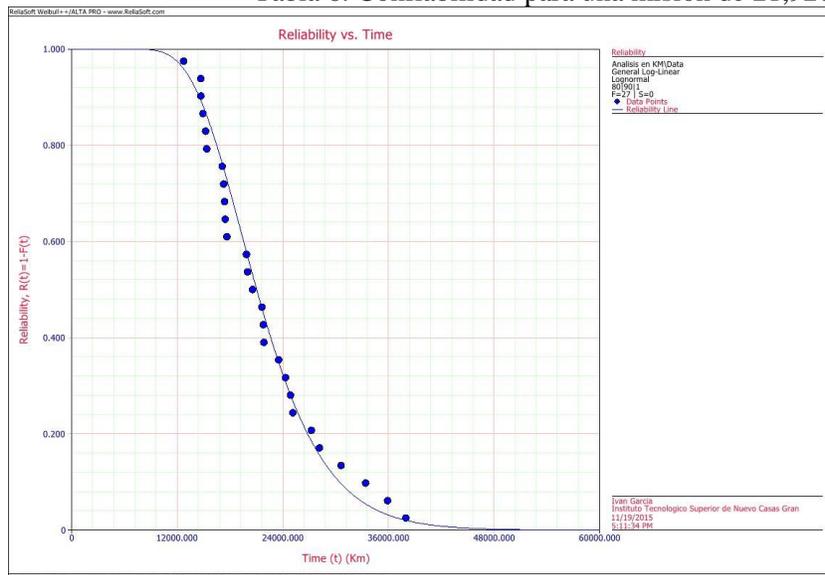


Figura 3. Comportamiento de R(t) vs tiempo

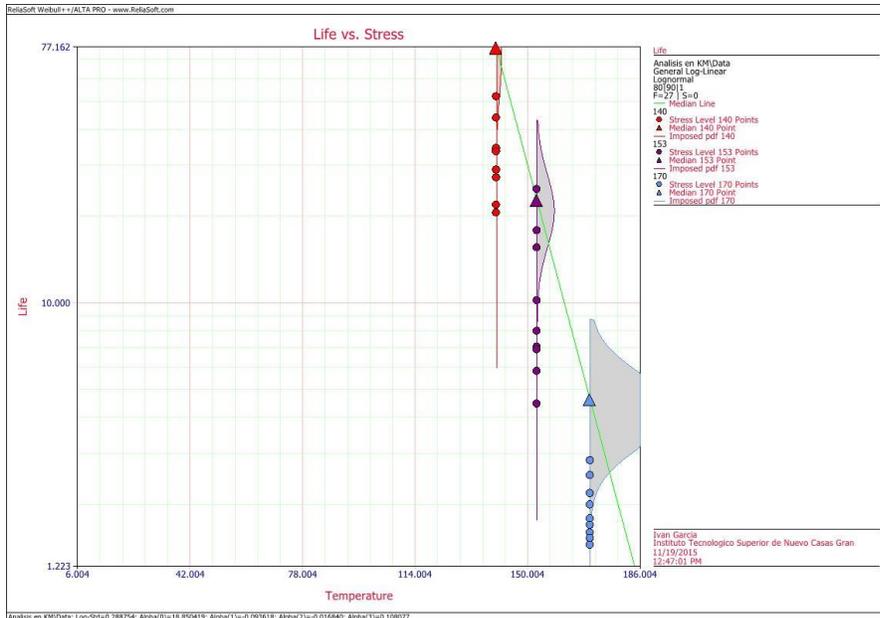
Para la estimación del tiempo de garantía se tiene que para una confiabilidad deseada de 0.8997

$$t_{(0.8997)} = t_{med} e^{S \cdot Z_{1-R}} = 21025.13 e^{0.288754(-1.28)} = 14,528.51 \text{ km.}$$

User Input	
Temperature =	80
Presion =	90
Speed =	1
Required Reliability =	0.8997
ALTA Output	
t(R=0.8997) =	14529 Km

Tabla 7. Resultados de ALTA para una confiabilidad deseada

El gráfico de relación vida-esfuerzo de la prueba muestra la línea de regresión generada por el modelo.



Resultados

La compañía esperaba que la vida útil de sello neumático estuviera entre los 15,000 y 20,000 kilómetros. La prueba muestra que el tiempo medio hasta el fallo (MTTF) de los sellos neumáticos de pistón es de 21,920 kilómetros. El resultado superó las

expectativas de vida, lo que implica que el producto que se encuentra aún en la fase de prueba es confiable y de buena calidad, por lo que se encuentra listo para lanzarlo al mercado.

ALTA Output	
Upper Bound (0.95) =	48536.30583
Mean Life =	21920.196719 Km
Lower Bound (0.05) =	9899.703243

Tabla 8. Tiempo medio hasta el fallo

El 10 por ciento de los sellos fallan a los 14,522 kilómetros de recorrido con un intervalo de confianza que se muestra en la

Tabla 9. Con esta información la empresa determino un periodo de garantía de sus sellos en 10,000 kilómetros.

ALTA Output	
Upper Bound (0.95) =	32292.04785
B10% Life =	14522.018374 Km
Lower Bound (0.05) =	6530.679585

Tabla 9. Estimación del tiempo de fallo del 10 por ciento de los sellos

Conclusiones y recomendaciones

Todos los objetivos planteados en esta investigación se cumplieron, con la determinación de los parámetros de modelo se pudo obtener las características de los sellos, de esta manera se pudo calcular el MTTF, B10 y B50, R(t), F(t) y h(t), con ello la compañía cuenta con datos confiables y podrá tomar decisiones basadas en hechos como el establecimiento de políticas de garantía. Los resultados superaron las expectativas de vida, lo que implica que el producto que se encuentra aún en la fase de prueba es confiable y de buena calidad, por lo que se encuentra listo para lanzarlo al mercado.

El factor de aceleración esta prueba en los niveles bajos fue de 597, significa que la prueba fue realizada bajo condiciones de estrés altas, por lo que es recomendable replicar la prueba a niveles más bajos.

Es de suma importancia considerar que el banco de pruebas tiene que ser capaz de alcanzar los niveles de estrés en los que se desean probar las unidades experimentales y además de permitir más de una condición de estrés. La confiabilidad de las inferencias estará delimitada por la calidad y versatilidad del equipo de prueba, y aunque en esta investigación no se evaluó la incertidumbre concerniente a la capacidad del equipo de prueba, es recomendable asegurarse de que el banco de pruebas a utilizar sea confiable.

En esta investigación, la variación concerniente a la calibración del sistema de medición se considera como incertidumbre propia del proceso, sin embargo, para el equipo de medición es recomendable que se asegure que cuente con la resolución adecuada a la variable que se pretende medir.

Referencias

Balakrishnan, N. (2010). *Advances in Degradation Modeling*. New York, NY: Advisory Board. <http://doi.org/10.1007/978-0-8176-4924-1> e-ISBN

Case, K. E. (1998). Using Design of Experiments for Accelerated Reliability Testing, (May).

Elsayed, E. a., & Zhang, H. (2007). Design of PH-based accelerated life testing plans under multiple-stress-type. *Reliability Engineering and System Safety*, 92(3), 286–

292.
<http://doi.org/10.1016/j.ress.2006.04.016>

General Motors, C. Calibrated Accelerated Life Testing (CALT), Pub. L. No. Test Procedure GMW8758 (2011).

Mashhadi, M. H. (1992). *On the Application of Design of Experiments to Accelerated Life Testing On the Application of Design of Experiments to Accelerated Life Testing*.

Meeker, W. Q., & Escobar, L. A. (1998). *Statistical Methods for Reliability Data* (3a Ed.). New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.

MoKinney, B. T. (1993). ACCELERATED RELIABILITY TESTING UTILIZING DESIGN OF EXPERIMENTS. *Security*, (December).

Monroe, E. M. (2013). OPTIMAL EXPERIMENTAL DESIGNS FOR ACCELERATED LIFE TESTS WITH CENSORING AND CONSTRAINTS.

Journal of Chemical Information and Modeling, 53(May), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

ReliaSoft. (2014). *Life Data Analysis Reference*. Tucson, Anizona: ReliaSoft Corporation. Retrieved from <http://www.weibull.com/>

The Association of German Engineers (VDI). (2006). VDI 4001 Reliability Terminology. Retrieved from <http://www.vdi.eu/engineering/vdi-standards>