

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/368898757>

# Modelado estadístico en pruebas aceleradas de confiabilidad en mantenimiento

Chapter · November 2022

---

CITATIONS

0

---

READS

41

3 authors, including:



[Jorge Adolfo Pinto-Santos](#)  
Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

32 PUBLICATIONS 2 CITATIONS

SEE PROFILE



[Manuel Iván Rodríguez-Borbón](#)  
New Mexico State University

45 PUBLICATIONS 489 CITATIONS

SEE PROFILE



# MODELOS Y METODOLOGÍAS

PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS  
DE IMPACTO SOCIAL Y PRODUCTIVO

*En memoria del **Dr Alfonso Aldape Alamillo**,  
decano del TecNM-IT Cd Juárez, México.*

**Coordinadores:**

Manuel Arnoldo Rodríguez Medina  
Iván Juan Carlos Pérez Olguín  
Eduardo Rafael Poblano Ojinaga



## Modelos y metodologías para la solución de problemas de impacto social y productivo

**ISBN (CENID): 978-607-8830-13-8**

**ISBN (AEVA): 978-84-09-46635-1**

Primera edición, 2022

Todos los derechos reservados.

© 2022, Manuel Arnoldo Rodríguez Medina, Iván Juan Carlos Pérez Olguin, Eduardo Rafael Poblano Ojinaga, coordinadores.

© 2022, Manuel Arnoldo Rodríguez Medina, Alejandra Flores Sánchez, Eduardo Rafael Poblano Ojinaga, Francisco Zorrilla Briones, Yuliana Meléndez Pastrana, Alfonso Aldape Alamillo,<sup>†</sup> Juan Pedro Benítez Guadarrama, Lizette Alvarado Tarango, Jesús Elisabeth Sánchez Padilla, Adrian Francisco Loera Castro, Brenda Pedroza Figueroa, Jorge Adolfo Pinto Santos, Miguel Ángel Hernández Rivera, Genoveva Cruz Hernández, Joeovany Rafael Rodríguez Mejía, Manuel Iván Rodríguez Borbón, Perla Ivette Gómez Zepeda, autores.

***Los conceptos expresados en este documento son responsabilidad exclusiva de los autores. Esta obra cumple con el requisito de evaluación por dos pares de expertos.***

**Edición:** Julio Rivas Rojas.

**Diagramación:** Felipe Ponce.

Editorial Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente. CENID AC es miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana Socio #3758.

Queda prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del contenido de la presente obra mediante algún método sea electrónico o mecánico (INCLUYENDO EL FOTOCOPIADO, la grabación o cualquier sistema de recuperación o almacenamiento de información), sin el consentimiento por escrito del editor.

### **Indexación de datos**

Bases de datos en las que *Editorial Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente CENID A.C.* está indexada: Dialnet (Universidad de la Rioja).

© 2022 Editorial Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente. CENID AC Pompeya # 2705. Colonia Providencia C.P. 44670 Guadalajara, Jalisco. México Teléfono: 01 (33) 1061 8187 Registro Definitivo Reniecyt No.1700205 a cargo de Conacyt.

© 2022 Editorial de la Asociación Científica para la Evaluación y Medición del los Valores Humanos c/ de les cases sert nº 11, C.P. 08193, Bellaterra – Cerdanyola del Vallés (Barcelona).

CENID y su símbolo identificador son una marca comercial registrada.

Impreso en México / Printed in México



Si desea publicar un libro o un artículo de investigación contáctenos.

[www.cenid.org](http://www.cenid.org)

[redesdeproduccioncenid@cenid.org](mailto:redesdeproduccioncenid@cenid.org)

## Índice

<b>Semblanza del Dr. Alfonso Aldape Alamillo</b>	<b>5</b>
<b>Introducción</b>	<b>7</b>
<b>Construcción de modelo para determinar factores significantes en la adquisición del Virus del Papiloma Humano</b>	<b>10</b>
Manuel Arnoldo Rodríguez Medina, Alejandra Flores Sánchez, Eduardo Rafael Poblano Ojinaga	
<b>Contraste metodológico entre un algoritmo de búsqueda directa y superficie de respuesta</b>	<b>33</b>
Francisco Zorrilla Briones, Yuliana Meléndez Pastrana, Alfonso Aldape Alamillo	
<b>Desarrollo Organizacional: Un Modelo</b>	<b>63</b>
Alfonso Aldape Alamillo,† Francisco Zorrilla Briones, Juan Pedro Benítez Guadarrama	
<b>Desnutrición y apoyo a comunidades marginadas y el impacto de su programa de RSE: caso de una empresa del norte de México</b>	<b>80</b>
Lizette Alvarado Tarango, Jesús Elisabeth Sánchez Padilla, Adrian Francisco Loera Castro	
<b>Evaluación de la inteligencia competitiva y la capacidad de innovación en empresas localizadas en la Región Lagunera-México</b>	<b>106</b>
Eduardo Rafael Poblano Ojinaga, Brenda Pedroza Figueroa, Jorge Adolfo Pinto Santos	
<b>Identificación de los factores críticos para mejorar la eficacia de la cadena de suministro: Una propuesta</b>	<b>132</b>
Miguel Ángel Hernández Rivera, Genoveva Cruz Hernández, Manuel Arnoldo Rodríguez Medina	
<b>Modelado estadístico en pruebas aceleradas de confiabilidad en mantenimiento</b>	<b>151</b>
Jorge Adolfo Pinto Santos, Joeovany Rafael Rodríguez Mejía, Manuel Iván Rodríguez Borbón	

**Resolución de un plan de distribución a través del razonamiento  
basado en casos y redes bayesianas**

Adrián Francisco Loera Castro, Perla Ivette Gómez Zepeda,  
Lizette Alvarado Tarango

# **Modelado estadístico en pruebas aceleradas de confiabilidad en mantenimiento**

## **Statistical modeling on accelerated maintenance reliability models**

**Jorge Adolfo Pinto Santos**

Tecnológico Nacional de México / IT de Ciudad Juárez, México

Jorge.ps@itcj.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-9614-2764>

**Joeovany Rafael Rodríguez Mejía**

Tecnológico Nacional de México / IT de Ciudad Juárez, México

jrodriguez@itcj.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4154-0778>

**Manuel Iván Rodríguez Borbón**

Industrial Engineering Department / New Mexico State University, USA

ivanrodr@nmsu.edu

<https://orcid.org/0000-0001-8405-4599>

## **Resumen**

Las organizaciones de clase mundial siempre se encuentran en la búsqueda de ser más competitivas, por lo que ofertan productos de gran calidad y además con un diseño que sea duradero de acuerdo con las expectativas del cliente. Evaluar la confiabilidad de un producto o componente para asegurar que cumpla con la durabilidad de diseño contribuye de forma vital a la aportación de la calidad y a la competitividad (Nelson, 2004). Se han desarrollado pruebas de vida aceleradas, que buscan provocar fallas más rápido que en usos normales; una de las más utilizadas son las pruebas de vida acelerada (ALT) y las pruebas de degradación acelerada (ADT) (Elsayed, 2012). En esta experimentación se aceleran los tiempos de falla, además, es posible analizar alguna característica de desempeño del producto y determinar la distribución de vida aun sin tener la presencia de fallas, con ello se extrapola la información a condiciones normales de operación. La aceleración de los tiempos de falla se realiza mediante variables denominadas de estrés (temperatura, voltaje, presión, etc.) para lograr los resultados del experimento en menores tiempos y a bajo costo. Los métodos no paramétricos son una opción

viable y económica para observar el comportamiento del deterioro de los herramientas utilizados en procesos tales como el de soldadura ultrasónica. Los rangos medianos son una técnica que emplea la aproximación de Benard para obtener la función acumulada de la distribución de probabilidad, y mediante cálculos del método de regresión de rango se obtienen los parámetros de una distribución adecuada a los datos. Existen diversos modelos para el análisis estadístico; este trabajo tiene el propósito de caracterizar el comportamiento del desgaste o pérdida de resistencia al jalón a través del método no paramétrico rangos medios, obteniendo la distribución acumulada de probabilidad Weibull, determinar los parámetros del comportamiento de la distribución de vida y evaluar la confiabilidad de la pieza para identificar el tiempo de cambio. Con la aplicación de la metodología se logran conocer las funciones que caracterizan el comportamiento de la herramienta analizada, por lo que se determina que el cambio de esta se halla en 270 piezas antes de que se produzcan fallas en el proceso.

**Palabras clave:** pruebas de vida, rangos medianos, confiabilidad, mantenimiento predictivo.

## **Abstract**

*World-class organizations are always looking to be more competitive, offering high-quality products with a design that meets customer expectations. Evaluating the reliability of a product is the component to ensure that it complies with the durability of the design, which is what makes a vital contribution to the contribution of quality and competitiveness (Nelson, 2004). Accelerated life problems have been developed, which seek to cause failures faster than in normal use, one of the most used are accelerated life problems (ALT) and accelerated degradation processes (ADT) (Elsayed, 2012). In this experiment, the times of failure are accelerated, in addition, it is possible to carry out the analysis of some characteristic of performance of the product and to determine the distribution of life without having the presence of failures, with the information being extrapolated to normal operating conditions. The acceleration of failure times is carried out using variables called stress (temperature, voltage, pressure, etc.), with which it is possible to have the results of the experiment in shorter times and at low cost. The non-parametric methods turn out to be a viable and economical option to observe the behavior of the deterioration of tools used in processes such as ultrasonic welding. The median ranks is a technique that uses the Benard approximation to obtain the accumulated function of the probability distribution and by means of calculations of the rank*

*regression method, the parameters of a distribution suitable for the data are obtained. There are several models for the statistical analysis, this work has the purpose of characterizing the wear behavior or the loss of resistance to jalon through the method in the parametric Rangos Medios, obtaining the Accumulated Distribution of Weibull Probability, determining the parameters of the behavior of the distribution of life and evaluating the reliability of the pieza to identify the time of change. With the application of the methodology, it is possible to determine the functions that characterize the behavior of the analyzed tool, determining the change of this in 270 pieces before failures occur in the process.*

**Keywords:** *Life expectancy, average ranks, reliability, predictive maintenance.*

## **Introducción**

Dentro de los procesos de innovación se diseñan productos competitivos, donde se introducen funciones nuevas, mejores materiales o se realizan cambios y/o mejoras en el proceso de manufactura, lo que tiene un impacto en su ciclo de vida (Roberto *et al.*, 2005; Sánchez y Pan, 2011). Asimismo, se requiere diseñar productos que aseguren tanto la funcionalidad como la confiabilidad para lograr un efecto positivo en la productividad (Ahmed, 1996; Meeker, 2010).

Por eso, el propósito de investigación de un proceso de manufactura, como lo es el de soldadura ultrasónica, consiste en evaluar el comportamiento de desgaste de la herramienta que se utiliza para unir los componentes y determinar el ciclo de vida. Considerando las técnicas estadísticas no paramétricas, las preguntas de la investigación responden a las posibilidades de modelar el comportamiento del desgaste o degradación. Por lo tanto, mejorar la confiabilidad de un producto es parte importante de la imagen más amplia de optimizar su calidad (Ahmed, 1996). La administración de las organizaciones, así como el área de ingeniería dedican sus esfuerzos a evaluar la confiabilidad, revisar nuevos diseños, cambios en los diseños y en la manufactura, identificar causas potenciales de falla, búsqueda de nuevos proveedores, materiales y métodos de fabricación. La toma de decisiones se complementa con datos de pruebas de vida de pocas piezas.

Por otro lado, una gran cantidad de productos tienen una alta duración, por lo que realizar pruebas de vida en condiciones de diseño son imprácticas. Analizar los datos del resultado de un experimento del ciclo de vida mediante una prueba acelerada requiere contar con la información de la vida del producto en las condiciones para las que

fue diseñado. Este tipo de pruebas contribuyen a ahorrar tiempo y recursos (Nelson, 2004).

La confiabilidad es uno de los elementos más importantes para lograr la calidad de los productos, ya que es un aspecto esencial para el diseño de los productos, así como del proceso (Evans y Lindsay, 2008). El punto relevante en los conceptos es que el entorno en el que opera un producto es un factor crítico en la evaluación de su confiabilidad (Meeker, 2001). Es así como se observa que para tener un panorama completo de la mejora en la calidad es primordial optimizar la confiabilidad del producto (Ahmed, 1996). Meeker (2010) cita a Condra (2001), quien señala a la confiabilidad como el rendimiento del producto a través del tiempo. Esto implica que lograr la calidad de un producto es necesario, aunque no lo es todo. Resalta la dificultad y el gran contraste que existe entre calidad y confiabilidad, ya que esta última solo puede ser evaluada directamente después de que el producto ha estado en operación durante algún tiempo, por lo que predecir la confiabilidad con exactitud presenta una serie de retos técnicos (Meeker, 2001).

De acuerdo con Elsayed (2012), el propósito fundamental de las pruebas de vida aceleradas es provocar que la falla o la degradación de los especímenes se presenten en menor tiempo para obtener datos de su comportamiento o de su degradación a través del tiempo y así determinar la estimación de la confiabilidad bajo condiciones de operación normal. Para calcular la confiabilidad, Elsayed (2012) señala que existen múltiples metodologías de prueba de confiabilidad. Estas contemplan experimentos que permiten identificar los posibles modos de falla, dentro de las cuales se tienen las siguientes pruebas: a) aceptación de confiabilidad, b) predicción de confiabilidad, c) vida acelerada (ALT), d) degradación acelerada (ADT), e) *Burn in*, de estrés de alta aceleración, entre otras. A continuación, la tabla 1.1 indica las pruebas de vida aceleradas, así como las fuentes donde se pueden consultar sus aplicaciones.

**Tabla 1.1** Pruebas aceleradas y aplicaciones

Pruebas aceleradas	Aplicaciones en literatura
a) Pruebas de vida altamente aceleradas (HALT)	(Xu <i>et al.</i> , 2011; Morris, 2017);
b) Prueba de crecimiento de confiabilidad (RGT)	(Awad, 2016);
c) Prueba de estrés de alta aceleración (HASS)	(Collins y Freels, 2013);
d) Prueba de demostración de confiabilidad (RDT)	(Guo y Liao, 2012);
e) Prueba de aceptación de confiabilidad	(Elsayed, 2012);
f) Prueba de quemado ( <i>burn in</i> )	(Huang y Pai, 2002; Ye <i>et al.</i> , 2012);
g) Autoprueba incorporada (BIST)	(McCluskey, 1985; Shah y Hasler, 2017);
h) Pruebas aceleradas de vida (ALT)	(Choi <i>et al.</i> , 2011; Collins y Freels, 2013)
i) Pruebas aceleradas de degradación (ADT)	(Sun <i>et al.</i> , 2016; Tang <i>et al.</i> , 2004)

Fuente: Pinto (2022)

Un modelo estadístico para pruebas de vida acelerada considera los siguientes componentes: la distribución de vida que representará la dispersión de la vida del producto y la relación vida-esfuerzo. Las distribuciones más usadas para estos modelos de pruebas de vida son los siguientes: exponencial, normal, *log* normal, Weibull y de valores extremos (Jiménez *et al.*, 2009). La tabla 1.2 refleja las distribuciones de probabilidad mayormente utilizadas en confiabilidad. Por otra parte, se requieren modelos que relacionen las variables de aceleración, temperatura, voltaje, presión con el tiempo de aceleración para interpretar los datos (Meeker *et al.*, 1998).

**Tabla 1.2** Distribuciones más aplicadas en confiabilidad

Distribución de vida	Función de densidad de probabilidad $f(t)$	Función de probabilidad acumulada $F(t)$	Función de confiabilidad $R(t)$	Función de tasa de riesgo $\lambda(t)$
Normal	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx$	$1 - F(t)$	$\frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}{\int_0^\infty \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx}$
Log normal	$\frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dx$	$1 - F(t)$	$\frac{f(t)}{1 - F(t)}$
Weibull	$\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$	$1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$	$\exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$	$\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$
Exponencial	$\lambda \exp(-\lambda t)$	$1 - \lambda \exp(-\lambda t)$	$\exp(-\lambda t)$	$\lambda$

Fuente: Pinto (2022)

En muchas situaciones, y por distintas razones, obtener datos en tiempos hasta la falla o datos de vida son muy difíciles de obtener y en ocasiones imposible. Dentro de las razones de esta dificultad se incluye una mayor durabilidad de los productos de la

actualidad, los periodos de tiempo entre el diseño y la producción y el reto de probar los productos que son empleados de forma continua bajo condiciones normales (Misra, 2008).

**Tabla 1.3** Relaciones vida-esfuerzo y factor de aceleración (Zhao y Elsayed, 2005)

Relación	Modelo	Factor de aceleración
Arrhenius	$C \exp\left(\frac{B}{V}\right)$	$\exp\left(\frac{B}{V_0} - \frac{B}{V_s}\right)$
Potencia Inversa	$\frac{1}{KV^l}$	$\left(\frac{V_s}{V_0}\right)^l$
Eyring	$\frac{1}{V} \exp\left(-\left(a - \frac{B}{V}\right)\right)$	$\frac{V_s}{V_0} \exp\left(B\left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_s}\right)\right)$
Temperatura – Humedad	$A \exp\left(\frac{\varphi}{V} + \frac{b}{U}\right)$	$\exp\left(\varphi\left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_s}\right) + b\left(\frac{1}{U_0} - \frac{1}{U_s}\right)\right)$
Temperatura no Térmica	$\frac{C \exp\left(\frac{B}{V}\right)}{U^n}$	$\left(\frac{U_s}{U_0}\right)^n \exp\left(B\left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_s}\right)\right)$

Fuente: Pinto (2022)

De acuerdo con Tang *et al.* (2004), con una prueba de degradación de vida acelerada, se identifica aquella característica de degradación que se correlaciona con la confiabilidad del producto y, por la cual, esta se irá degradando en el tiempo o tendrá una pérdida de su desempeño (Rodríguez-Picón *et al.*, 2017). Boulanger y Escobar (1994) señalan que los datos obtenidos en las pruebas implican la realización de extrapolación en dos dimensiones: la variable de estrés y el tiempo. La modelación relacionará las variables de aceleración (temperatura, voltaje, presión, etc.) con el tiempo de aceleración para estimar la confiabilidad (Meeker *et al.*, 1998). Las relaciones de vida-esfuerzo más comúnmente utilizadas, así como el factor de aceleración se pueden observar en la tabla 1.3.

### 1.1. Distribución Weibull

Tobías y Trindade (2012) señalan que, en ocasiones, no es factible analizar datos exponenciales y planificar experimentos de pruebas de vida, ya que estos se aplican solo bajo el supuesto de tasas de falla constante o cuando está presente la propiedad de la falta de memoria. Los casos donde se presenta claramente que la tasa de falla o fracaso disminuye o aumenta es una situación que fue abordada por Weibull (1951), quien desarrolló una distribución flexible con una amplia variedad de posibles formas de curvas de tasa de falla. Dado que la distribución Weibull se puede derivar como una de

valor extremo, sugiere su aplicación teórica cuando la falla se deba a un "eslabón más débil" de muchas probables ubicaciones donde se pueda presentar alguna.

Encontrar una función de distribución acumulativa (CDF) que tenga una amplia variedad de formas de tasa de falla, con la constante  $h(t) = \lambda$  como solo una posibilidad. Permitir cualquier forma polinomial del tipo  $h(t) = at^b$  para una función de tasa de falla logra este objetivo. Para derivar  $F(t)$  es más fácil comenzar con la función de riesgo acumulativa  $h(t) = \frac{dH(t)}{dt}$

$$\text{Si } H(t) = (\lambda t)^\beta, \text{ entonces tenemos } h(t) = \beta\lambda(\lambda t)^{\beta-1} \quad (1.1)$$

Esta forma nos da la tasa de falla constante exponencial cuando  $\beta = 1$  y una tasa de falla polinomial para otros valores de  $\beta$ .

$$\text{Ahora bien, si } F(t) = 1 - e^{-H(t)} = 1 - e^{-(\lambda t)^\beta}$$

Si hacemos que  $\alpha = 1/\lambda$  obtenemos

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (1.2)$$

Al parámetro  $\alpha$  (alpha) se le llama *parámetro de escala* o *característica de vida* y el parámetro  $\beta$  (beta) es conocido como *parámetro de forma*; ambos deben ser positivos y la distribución es una de vida definida solo para un tiempo positivo, donde  $0 \leq t < \infty$ .

La función de densidad de probabilidad (PDF) es

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{t}\right) \left(\frac{t}{\alpha}\right) e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (1.3)$$

La tasa de riesgo es

$$h(t) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} = \left(\frac{\beta}{t}\right) \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \quad (1.4)$$

La tasa promedio de fallas (AFR) es

$$AFR(t_1, t_2) = \frac{\left(\frac{t_2}{\alpha}\right)^\beta - \left(\frac{t_1}{\alpha}\right)^\beta}{t_2 - t_1} \quad (1.5)$$

$$AFR(T) = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \left(\frac{T}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (1.6)$$

## 1. 2. Métodos no paramétricos

### 1.2.1. Rango mediano

De acuerdo con O'Connor y Keyner (2012), el método de rango mediano se puede definir como el porcentaje acumulativo de la población representada por una muestra de datos en particular con 50 % de confianza. Los métodos más comunes para calcular el rango mediano incluyen binomio acumulativo y su aproximación algebraica.

### 1.2.2. Método binomial acumulativo para rango mediano

El rango mediano es posible calcularlo mediante la resolución de la distribución binomial acumulativa para  $Z$  (*rango para la  $j$ -ésima falla*) (Nelson, 1982):

$$P = \sum_{k=j}^N \binom{N}{k} Z^k (1 - Z)^{N-k} \quad (1.7)$$

donde  $N$  es el tamaño de la muestra y  $j$  es el número de orden.

El rango mediano se obtiene resolviendo la siguiente ecuación para  $Z$ :

$$0.50 = \sum_{k=j}^N \binom{N}{k} Z^k (1 - Z)^{N-k}$$

Así, se puede replicar esta metodología cambiando el valor de  $P$  de 0.50 (50 %) al nivel de confianza deseado. Por ejemplo, para  $P = 95$  %, se formularía la ecuación como:

$$0.95 = \sum_{k=j}^N \binom{N}{k} Z^k (1 - Z)^{N-k}$$

### 1.2.3. Aproximación algebraica del rango mediano

En el cálculo del rango mediano se utiliza la fórmula de aproximación, también conocida como *aproximación de Bernard*.

El valor de rango  $j$  es aproximado por

$$\text{Rango mediano } r_j = \frac{j - 0.3}{N + 0.4} \quad (1.8)$$

Donde:  $j$  = número de orden de falla y  $N$  = tamaño de la muestra.

#### 1.2.4. Aplicación de la distribución de Weibull

Utilizando la distribución de probabilidad de Weibull, se puede mostrar las técnicas de trazado de probabilidad y el análisis de datos de vida mediante el cálculo del rango mediano.

La función de distribución de fallas acumuladas  $F(t)$  es

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1.9)$$

Donde  $t = tiempo$

$\beta = parametro\ de\ forma$

$\alpha = Caracteristica\ de\ vida\ o\ parametro\ de\ escala$

Rescribiendo la ecuación (27) se tiene:

$$\frac{1}{1 - F(t)} = \exp\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta$$

O bien tomando logaritmo natural, la ecuación toma la siguiente forma

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} = \beta(\ln t) - (\beta \ln \alpha)$$

Se puede notar que la ecuación tiene la forma  $Y = \beta X + C$

Donde

$$X = \ln t$$

$$Y = \ln \ln \frac{1}{1 - F(t)}$$

$$C = -\beta \ln \alpha$$

#### 1.3. Enfoques del mantenimiento

El mantenimiento es la actividad de combinar las acciones técnicas y administrativas, incluida la supervisión destinada a mantener un producto en un estado en el que pueda desempeñar la función para la que fue diseñado (Parida y Kumar, 2006). Las técnicas del mantenimiento en la actualidad se han mantenido en constante cambio gracias a los avances tecnológico como el internet de las cosas, la tecnología de detección, la inteligencia artificial, etc., desde donde se puede observar la transición de estrategias del mantenimiento correctivo hacia el preventivo y hacia lo predictivo (Ran *et al.*, 2019).

Susto *et al.*, (2015) mencionan que en la gestión del mantenimiento existen tres principales categorías:

1. **Run-to-Failure (R2F):** Es el enfoque más simple, sin embargo, es el menos efectivo debido a que el costo de la intervención y el tiempo de inactividad que se ocasionan después de ocurrir la falla llega a ser mucho más importante que aquellos que están asociados con las acciones correctivas planificadas.
2. **Mantenimiento preventivo (PvM):** De acuerdo con un cronograma planificado que se fundamenta en iteraciones de tiempo o proceso, son realizadas las actividades. Con este enfoque se evitan fallas, aunque se llegan a presentar acciones correctivas que no eran necesarias, lo que ocasiona una aplicación de recursos ineficiente y costos operativos altos.
3. **Mantenimiento predictivo (PdM):** Se realiza una estimación del estado de una pieza de equipo, lo que permite la detección anticipada de fallas y con ello realizar una intervención oportuna en los equipos antes de que ocurran las fallas.

El propósito del enfoque predictivo es realizar el mantenimiento necesario en la búsqueda de cambios en la condición física de los equipos para incrementar su vida útil y con ello disminuir el riesgo de presencia de falla. Según los métodos para detectar los síntomas de falla, el mantenimiento predictivo se clasifica en dos tipos: 1) basado en estadísticas y 2) basado en condiciones. El mantenimiento predictivo basado en estadísticas (SBM por sus siglas en inglés) se enfoca en crear modelos que puedan predecir fallas. Esto dependerá de la información que se obtenga registrando en los tiempos de paro de los productos y/o componentes en la planta. Por otra parte, el mantenimiento predictivo basado en condiciones (CBM por sus siglas en inglés) requiere de las condiciones del monitoreo continuo del equipo que permita detectar los síntomas de falla y tomar decisiones que conduzcan a realizar las actividades de mantenimiento (Wang, 2016).

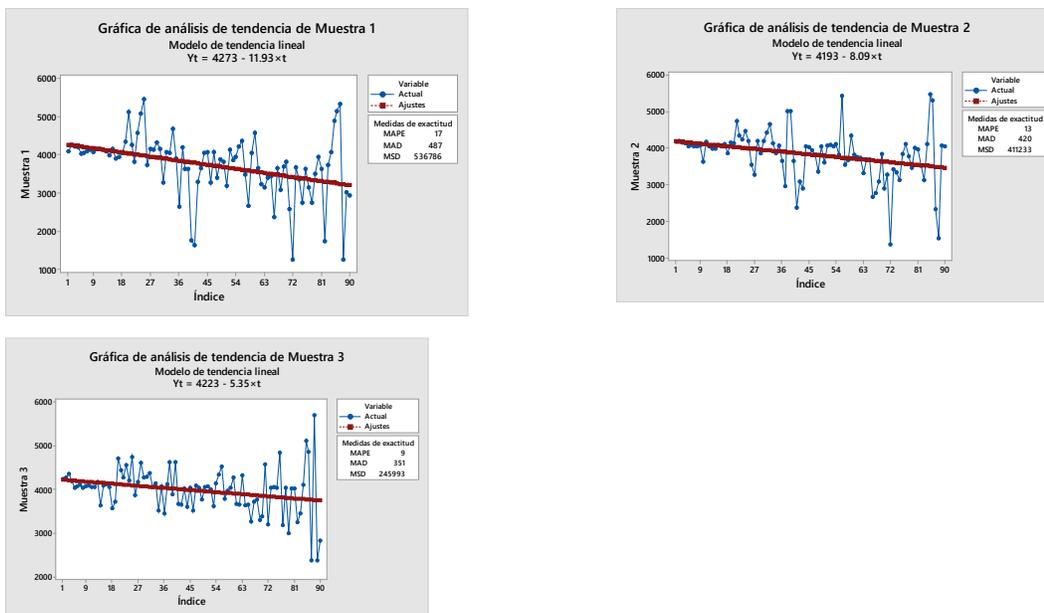
## **Metodología**

### **Materiales**

Dentro del proceso de soldar terminales en el cableado, se observa el comportamiento de la resistencia al jalón con el propósito de lograr determinar el momento de cambio oportuno de la herramienta utilizada, conocida como ANVIL. Los datos recabados para este análisis los ha proporcionado una industria del sector automotriz de

Ciudad Juárez, gracias a que se tuvo acceso a las mediciones de resistencia que serán utilizados para determinar el tiempo de cambio de la herramienta. Se establece en este estudio que la medida de la característica del desempeño del proceso es considerada como la degradación que se observa a través del uso de la herramienta de soldado perdido del desempeño. Este análisis se realiza mediante un análisis estadístico paramétrico y posteriormente con uno no paramétrico. Se efectúa el análisis gráfico de los datos recopilados para observar la tendencia que siguen estos. En las gráficas que se muestran en la figura 2.1 es posible observar la existencia de una tendencia descendente en cada una de las muestras.

**Figura 2.1** Análisis del comportamiento de tendencia de las muestras 1, 2 y 3



Además, el análisis de varianza se utiliza para validar la significancia de las variables *tiempo de soldadura* y *distancia absoluta* que se determinó podrían estar vinculadas con la variable de salida —resistencia al jalón—. En la tabla 2.2 se muestra solo parte de los datos recabados.

**Tabla 2.1** Datos de las variables predictoras y la variable de respuesta

	Y's	X's predictores	
Muestra nro.	Resistencia al jalón	Tiempo de soldadura	Distancia absoluta
1	4093	69.28	82.7907
2	4257	69.13	80.9641
3	4212	69.23	79.8424
4	4184	69.3	80.7047
5	4027	69.39	81.8282
6	4051	69.33	81.2974
7	4087	69.37	81.5881
8	4136	69.34	80.7134
9	4066	69.37	82.7522
f10	4180	69.27	81.4091

Fuente: Elaboración propia

La tabla 2.2 contiene el análisis de varianza obtenido mediante *software* Minitab donde se concluye que siendo el valor p menor al nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 5 %, las variables independientes *tiempo de soldadura*, *distancia absoluta* y la interacción entre ellas efectivamente tienen una relación lineal significativa con la variable de respuesta-resistencia al jalón.

**Tabla 2.2** Análisis de varianza

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados ajust.	Media de cuadrados ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	42360152	14120051	37.83	0
Tiempo de soldadura	1	2713169	2713169	7.27	0.007
Distancia absoluta	1	2911199	2911199	7.8	0.006
Tiempo de Soldadura *Distancia absoluta	1	2923671	2923671	7.83	0.006
Error	266	99296297	373294		
Total	269	141656449			

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2.3 se muestra con detalle el resumen del modelo lineal de regresión, así como del ajuste del modelo mediante el coeficiente de determinación de los datos analizados. El coeficiente de determinación o  $R^2$  nos indica que la variabilidad que el modelo toma en cuenta es de 29.9 %.

**Tabla 2.3** Resumen del modelo lineal de regresión y coeficiente de determinación

Término	Coefficiente	EE del coef.	Valor T	Valor p	VIF
Constante	-1096852	409106	-2.68	0.008	
Tiempo de soldadura	15799	5860	2.7	0.007	8604.31
Distancia absoluta	13914	4982	2.79	0.006	32042.38
Tiempo de soldadura*Distancia absoluta	-199.7	71.4	-2.8	0.006	64760.7
Resumen del modelo	S	R-cuad	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)	Valor $p < \alpha$
	610.978	29.90%	29.11%	27.58%	
Ecuación de regresión	Resistencia al jalón = -1096852 + 15799 tiempo de soldadura + 13914 Distancia Absoluta - 199.7 tiempo de soldadura*Distancia Absoluta				

Fuente: Elaboración propia

### Análisis mediante métodos no paramétricos

O'Connor y Keyner (2012) señalan que en primera instancia los datos deben ser ordenados con la finalidad de trazar la variable de interés (tiempo, millas, ciclos o alguna otra) que, en conjunto con el porcentaje de probabilidad acumulado, será posible obtener la probabilidad acumulada en cada uno de los datos. Si los datos no se comportan de acuerdo con una distribución normal, es posible hacer uso del método de rangos medianos. Se utiliza la ecuación 2.1 de aproximación de Benard para calcular los rangos medianos.

$$\hat{F}(x) = \frac{j - 0.3}{N + 0.4} \quad (2.1)$$

La estimación de los parámetros se obtiene haciendo los cálculos siguiendo el principio de los mínimos cuadrados del método de regresión de rango (*rank regression*). Con el modelo de regresión se obtiene el estimador para la función acumulada de falla

$F(x)$ . Este es un estimador no paramétrico basado en el orden de falla, lo que implica que los datos deben organizarse en forma ascendente. De acuerdo con Genschel y Meeker (2010), primero se ordena el conjunto de datos del valor más pequeño al más grande.

En los cálculos del método no paramétrico de rangos medianos se determina hacer uso de la distribución Weibull de dos parámetros, siendo el análisis de la distribución de probabilidad acumulada  $F(t)$ .

$$F(t) = 1 - \exp \left[ \left( -\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad t \geq 0 \quad (2.2)$$

Linealizando esta función, se obtiene

$$\ln \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right] = \beta \ln(t) - \beta \ln \alpha \quad (2.3)$$

la cual es una ecuación lineal de la forma

$$y = \beta x + b \quad (2.4)$$

donde

$$y = \ln \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right] \quad (2.5)$$

$$x = \ln(t) \quad (2.6)$$

y

$$b = -\beta \ln(\alpha) \quad (2.7)$$

Para obtener la confiabilidad del análisis se obtiene mediante

$$R(t) = \exp \left[ \left( -\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right], \quad t \geq 0 \quad (2.8)$$

Se hace uso del *software* estadístico Minitab y Rstudio para llevar a cabo el análisis de los datos de degradación obtenidos para mostrar el método y presentar los resultados en la siguiente sección. La serie de códigos utilizados en el análisis se muestran en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4** Resumen del código de *software* Rstudio

Descripción	Código en Rstudio
Datos ordenados de menor a mayor	Datord<- order(Datos, decreasing = FALSE)
Etiquetar en una variable Y	Y<- Datos[Datord]
Presentación de los datos en un histograma	hist(Datos)
Método de los rangos medianos	r<-1:270 n<-length(r) F<-(r-0.3)/(n+0.4)
Presentación de tabla con información obtenida	Tabla<-data.frame(Y,r,n,F)
Modelo de regresión	y<- log(log((1/(1-F)))) x<-log(Datos) Mod1<- lm(y ~ x) Mod2<- lm(x ~ y)

Fuente: Elaboración propia

## Resultados

Los datos analizados en este trabajo son el resultado de mediciones de resistencia a la tensión (o jalón) de un proceso de soldadura de contacto, donde el electrodo (la herramienta) sufre un proceso de degradación, lo que genera con su uso una disminución en la resistencia a la tensión de las piezas soldadas. El análisis de la información se lleva a cabo utilizando un método no paramétrico. La tabla 3.1 contiene una muestra de los datos de la variable de respuesta que se define como la resistencia a la tensión o jalón.

**Tabla 3.1** Datos de la prueba de resistencia a la tensión (fuerza)

4093	4257	4212	4184	4027	4051	4087	4136	4066	4180	4202	4156	4140	4042	4094
4046	4051	4068	4240	4274	4351	4187	4042	4070	4107	4037	4073	4158	3634	4076
4148	4167	4048	4130	4052	4050	4098	3973	4160	3991	3988	3624	4149	4091	4091
3891	4052	4116	3936	4106	4050	4046	3858	3567	4341	4160	4712	5115	4120	4706
4264	4746	4441	4811	4340	4270	4570	4245	4561	5072	4472	4194	5458	4187	4743
3730	3533	3860	4147	3278	4160	4132	4197	4604	4320	3860	4270	4153	4202	4289
3266	4416	4373	4076	4665	4053	4044	4124	4128	4676	3856	3507	3895	4076	4065

2636	3656	3445	4184	2949	4116	3619	5013	4630	3619	5013	3875	1759	3647	4630
1625	2356	3658	3281	3082	3641	3645	2884	4025	4040	4037	3600	4067	4030	4033
3268	3947	3518	4060	3805	4076	3388	3344	4036	3876	4036	3761	3824	3610	4052
3182	4075	4059	4132	4084	2003	3853	4055	3610	3951	4101	4131	4209	3810	4333

Fuente: Elaboración propia

### Aplicación del método de rangos medianos

Se desarrolla la aplicación del método estadístico no paramétricos, donde se utiliza el método de rangos medianos para obtener la distribución de probabilidad acumulada  $F(x)$ . Los cálculos se realizan mediante códigos de programación del *software* R en su versión 3.6.3. A continuación, se muestran los pasos que se siguen para la obtención de información del análisis de los datos.

1. Introducción de los datos de falla (tabla 3.1).

```
datos <- c(4093, 4257, 4212, ..., ..., 2830)
```

2. Generación de secuencias.

```
r <- 1:270
```

3. Obtención de la longitud del vector.

```
n <- length(r)
```

4. Cálculo de los rangos medianos ( $\hat{F}$ ).

```
 $\hat{F} <- (r - 0.3) / (n + 0.4)$ 
```

5. Cálculo del vector  $x$ .

Asumiendo que los datos de degradación siguen una distribución Weibull, se tiene que la distribución de probabilidad acumulada es:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right], t \geq 0$$

de donde se obtiene

$$\ln \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right] = \beta \ln(t) - \beta \ln \alpha$$

Si se considera el modelo general de regresión lineal, la ecuación lineal tiene la forma

$$y = ax + b$$

donde

$$y = \ln \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right], x = \ln(t), b = -\beta \ln(\alpha)$$

El vector graficado en el eje de las  $x$  será

$$x < -\ln \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right]$$

6. Formación del cuadro de información con los datos (Y, r, n F)  
 Siguiendo el código en el *software* R Studio con datos ordenados de forma ascendente, se obtiene la información del rango mediano. En la tabla 3.2 se observa una muestra de los datos obtenidos.

**Tabla 3.2** Muestra de los valores F calculados

N.º	Y	R	N	F	N.º	Y	r	n	F
1	2106	1	270	0.00258876	18	2427	18	270	0.06545858
2	2106	2	270	0.00628698	19	2480	19	270	0.06915681
3	2136	3	270	0.00998521	20	2532	20	270	0.07285503
4	2137	4	270	0.01368343	21	2569	21	270	0.07655325
5	2139	5	270	0.01738166	22	2625	22	270	0.08025148
6	2168	6	270	0.02107988	23	2636	23	270	0.0839497
7	2201	7	270	0.02477811	24	2658	24	270	0.08764793
8	2206	8	270	0.02847633	25	2670	25	270	0.09134615
9	2252	9	270	0.03217456	26	2689	26	270	0.09504438
10	2265	10	270	0.03587278	27	2740	27	270	0.0987426
11	2309	11	270	0.03957101	28	2743	28	270	0.10244083
12	2319	12	270	0.04326923	29	2759	29	270	0.10613905
13	2321	13	270	0.04696746	30	2774	30	270	0.10983728
14	2356	14	270	0.05066568	31	2830	31	270	0.1135355
15	2364	15	270	0.05436391	32	2837	32	270	0.11723373
16	2365	16	270	0.05806213	33	2884	33	270	0.12093195
17	2369	17	270	0.06176036	34	2899	34	270	0.12463018

Fuente: Elaboración propia

7. Obtención de los parámetros de la función de densidad de probabilidad.

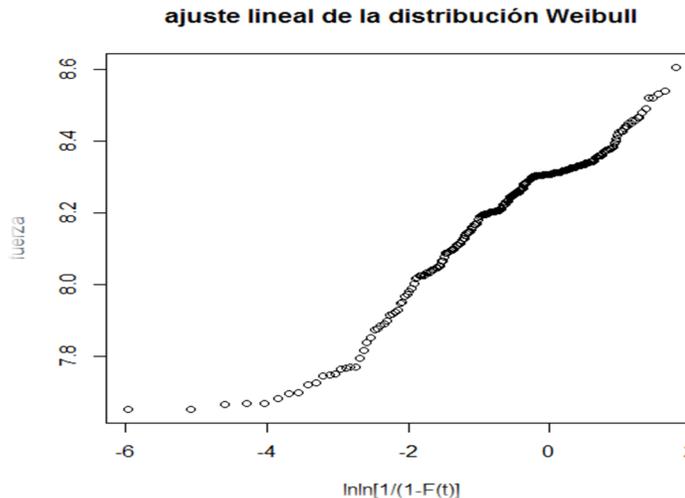
En la tabla 3.3 se encuentran los resultados del modelo lineal realizado mediante el *software* R Studio. En él se obtienen sus coeficientes, que son utilizados para la obtención de los parámetros de forma ( $\beta$ ) y de escala ( $\alpha$ ) de la distribución Weibull. En la gráfica 3.1 se observa el análisis lineal del ajuste de los datos obtenidos previamente mediante el método de rangos medianos, linealizando la CFD Weibull.

**Tabla 3.3** Resultados del modelo de regresión.

Coeficientes		Residuales				
		Min.	1Q	Mediana	3Q	Max.
		-1.78622	-0.18879	-0.02537	0.17898	0.65484
Variable	Estimación	Error Estándar	Valor t	Pr(> t )	Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1	
(Intercepto)	53.68500	-0.64641	-83.05	<2e-16 ***		
X	6.47052	0.07873	82.19	<2e-16 ***		
Error estándar residual: 0.2474 con 268 grados de libertad.						
R <sup>2</sup> Múltiple: 0.9618, R <sup>2</sup> , Ajustada: 0.9617						
Estadístico F: 6755 con 1 y 268 g.l., valor -p: < 2.2e-16						

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.1** Ajuste lineal de la distribución Weibull



De los resultados mostrados en la tabla 3.3, el valor del intercepto es  $b = -53.685$  y el valor de la pendiente  $\beta = 6.471$ . Con estos valores de los coeficientes se realizan los cálculos para obtener los parámetros de la distribución Weibull:

$$\ln\alpha = b$$

$$\beta=53.6856.471$$

$\ln \alpha = \frac{b}{\beta} = \frac{53.685}{6.471} = 8.296$ , por lo tanto, el parámetro de escala  $\alpha$  es

$$\alpha = e^{8.296} = 4007.8$$

La función de densidad de probabilidad de la distribución Weibull —ecuación (4)— es:

$$f(x) = 0.001615 \left(\frac{x}{4007.8}\right)^{6.471} e^{-\left(\frac{x}{4007.8}\right)^{6.471}}$$

La función de confiabilidad es:

$$R(x) = e^{-\left(\frac{x}{4007.8}\right)^{6.471}}$$

La tasa de riesgo o función de riesgo se puede ser escrita como sigue:

$$h(x) = 0.001615 \left(\frac{x}{4007.8}\right)^{6.471}$$

El valor esperado será

$$E(x) = 4007.8 \Gamma\left(1 + \frac{1}{6.471}\right) = 4007.8(0.9298) = 3726.45 N$$

La varianza estará dada aproximadamente por

$$\sigma^2 = (4007.8)^2 \left\{ \Gamma(1.31) - (\Gamma(1.15))^2 \right\} = (4007.8)^2 \{ (0.896) - (0.9298)^2 \} = 505517.125$$

con  $\sigma = 711.0 N$

Como se puede observar, se obtiene un tiempo promedio para la falla (MTTF) o valor esperado de 3726.45 N.

## Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

En la industria maquiladora de Cd. Juárez, brinda mantenimiento a equipos siguiendo la filosofía del mantenimiento productivo total, que consiste en mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo. Sin embargo, la mayoría de las acciones de los departamentos van dirigidos hacia el correctivo. La industria programa el preventivo en función del personal con que cuenta. El mantenimiento predictivo requiere de la

aplicación de conceptos distintos a lo tradicional, ya que el enfoque primordial es anti-ciparse a la falla de los equipos. Inicialmente se necesitará conocer el comportamiento de los tiempos de falla para definir la función de densidad de probabilidad y obtener el valor esperado-MTTF y la tasa de riesgo para modelar el comportamiento y realizar la predicción de las fallas. El propósito es determinar el momento oportuno de cambio de la herramienta (ANVIL) para asegurar que las piezas soldadas cumplan con el valor especificado de resistencia hacia el jalón, de esa manera se anticipa a la falla. Para evaluar la confiabilidad de los equipos se recurre al análisis de los datos como un comportamiento de la trayectoria de degradación o pérdida del rendimiento.

Es posible obtener la función de densidad de probabilidad mediante un *software* como Minitab® o Weibull++ de Reliasoft, sin embargo, se consideró hacer uso de un método estadístico alternativo como lo es uno no paramétrico, en conjunto con el para-métrico, el cual utiliza una ordenación de los rangos para obtener la función acumulada de falla.

La caracterización de la función de densidad de probabilidad se logra con el análisis de datos de la degradación del ANVIL, obteniendo una función que permite observar el comportamiento de la resistencia a la tensión y determinar el cambio oportuno de la herramienta antes de provocar fallas en los productos soldados. El modelo estadístico que permite caracterizar la confiabilidad de la herramienta se determina a través de la distribución Weibull, donde se obtiene que el parámetro de escala es de 4007.8 y el parámetro de forma es 6.471. El comportamiento de la distribución de la resistencia a la tensión muestra que la herramienta debe retirarse antes de las 270 piezas soldadas sin riesgo de que aparezcan resistencias menores al límite inferior especificado de 2000 lbs/plg<sup>2</sup>. El valor esperado fue de 3726.45 N con una desviación estándar de 711 N.

El uso de esta metodología contribuye a la implementación de acciones de mantenimiento industrial, específicamente en los cambios de la herramienta usada para la soldadura de las terminales en los cables, y se plantea como una alternativa del mantenimiento predictivo que permitirá tomar decisiones acertadas en los procesos de manufactura antes de que se generen productos con defecto.

### **Recomendaciones y futuras líneas de investigación**

Se recomienda extender esta investigación a otros procesos productivos donde se pueda evaluar la efectividad de los resultados. Asimismo, otras áreas del conocimiento que sería recomendable explorar son las redes bayesianas, los modelos de degradación con procesos estocásticos y la aplicación algoritmos de *machine learning* para la predicción de eventos de falla. Otras líneas de investigación para el futuro es realizar

trabajo sobre el mantenimiento centrado en confiabilidad aplicando distintas técnicas estadísticas.

En este trabajo no se consideran los planes de prueba, sin embargo, sería recomendable realizar el diseño de una prueba de vida controlada para obtener nuevos datos y hacer comparaciones con los resultados del análisis presentado.

## Referencias

- Ahmed, J. U. (1996). Modern approaches to product reliability improvement. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 13(3), 27–41.  
<https://doi.org/10.1108/02656719610116063>
- Awad, M. (2016). Economic allocation of reliability growth testing using Weibull distributions. *Reliability Engineering and System Safety*, 152, 273–280.  
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.03.012>
- Boulanger, M., & Escobar, L. A. (1994). Experimental design for a class of accelerated degradation tests. *Technometrics*, 36(3), 260-272.
- Choi, H. S., Seo, W. S. and Choi, D. K. (2011). Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics-of-failure. *Electronic Materials Letters*, 7(3), 271–275. <https://doi.org/10.1007/s13391-011-0917-x>
- Collins, D. and Freels, J. (2013). Accelerated Test Methods for Reliability Prediction. *Journal of Quality Technology*, 45(3), 244–259.
- Condra, L. (2001). *Reliability Improvement with Design of Experiment*. CPD.
- Elsayed, E. A. (2012). Overview of reliability testing. *IEEE Transactions on Reliability*, 61(2), 282–291. <https://doi.org/10.1109/TR.2012.2194190>
- Evans, J. and Lindsay, W. (2008). *Administración y control de la calidad*. Cengage Learning.
- Genschel, U. and Meeker, W. Q. (2010). A Comparison of Maximum Likelihood and Median-Rank Regression for Weibull Estimation. *Quality Engineering*, 22, 236–255.  
<https://doi.org/10.1080/08982112.2010.503447>
- Guo, H. and Liao, H. (2012). Methods of reliability demonstration testing and their relationships. *IEEE Transactions on Reliability*, 61(1), 231–237. <https://doi.org/10.1109/TR.2011.2167782>
- Huang, S.-J. and Pai, F.-S. (2002). Design and Operation of Burn-In Test System for. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(1), 256–263.
- Jiménez, J., Alamilla López N. E. y López Cerino, M. (2009). Pruebas de vida acelerada en confiabilidad. *Ciencia y Tecnología*, 13, 33–37.
- McCluskey, E. J. (1985). Built-In Self-Test Techniques. *IEEE Design and Test of Computers*, 2(2), 21–28. <https://doi.org/10.1109/MDT.1985.294856>
- Meeker, W. Q., Escobar, L. a, & Lu, C. J. (1998). Accelerated Degradation Tests: Modeling and Analysis. *Technometrics*, 40(2), 89–99. <https://doi.org/10.1080/00401706.1998.10485191>
- Meeker, W. Q. (2001). Reliability : the other dimension of quality. W . J . Youden Memorial Address. *Asq Statistics Division Newsletter*, 21(2).

- Meeker, W. Q. (2010). Trends in the Statistical Assessment of Reliability. *Advances in Degradation Modeling*, 3–16. [https://doi.org/10.1007/978-0-8176-4924-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-8176-4924-1_1)
- Misra, K. B. (2008). Reliability Engineering: A Perspective. *Handbook of Perfor Mability Engineering, October*, 253–289.
- Morris, G. K. (2017). Taking the (Emotional) Stress Out of HALT. *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/RAM.2017.7889745>
- Nelson, W. B. (2004). *Accelerated Testing- Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
- O'Connor, P. and Keyner, A. (2012). *Practical Reliability Engineering* (5<sup>th</sup> ed.). John Wiley & Sons.
- Parida, A. and Kumar, U. (2006). Maintenance performance measurement (MPM): Issues and challenges. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(3), 239–251. <https://doi.org/10.1108/13552510610685084>
- Ran, Y., Zhou, X., Lin, P., Wen, Y. and Deng, R. (2019). A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20, 1-36.
- Rodríguez-Picón, Luis Alberto, Flores-Ochoa, V. H., Méndez-González, L. C., & Rodríguez-Medina, M. A. (2017). Bivariate degradation modelling with marginal heterogeneous stochastic processes. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 87(11), 2207–2226. <https://doi.org/10.1080/00949655.2017.1324858>
- Roberto, J., Reza, D., Iván, M., Borbón, R., David, R. y Arredondo, M. (2005). *Ingeniería industrial patrones desarrollo de un plan de prueba para pruebas de vida acelerada en el sensor knock Introducción*. 55.
- Sánchez, L. M. and Pan, R. (2011). An Enhanced Parenting Process: Predicting Reliability in Product's Design Phase. *Quality Engineering*, 23(4), 378–387. <https://doi.org/10.1080/08982112.2011.603110>
- Shah, S. and Hasler, J. (2017). Tuning of Multiple Parameters With a BIST System. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 64(7).
- Sun, F., Liu, L., Li, X. and Liao, H. (2016). Stochastic Modeling and Analysis of Multiple Nonlinear Accelerated Degradation Processes through Information Fusion. *Sensors*, 16(8), 1242. <https://doi.org/10.3390/s16081242>
- Susto, G. A., Schirru, A., Pampuri, S., McLoone, S. and Beghi, A. (2015). Machine Learning for Predictive Maintenance : A Multiple Classifiers Queen ' s University Belfast - *Research Portal Machine Learning for Predictive Maintenance : A Multiple Classifiers Approach*. 11, 812–820.
- Pinto, J. A. (2022). *Caracterización de una función de densidad de probabilidad mediante un análisis de degradación usando estadísticos no paramétricos* (tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Tang, L. C., Yang, G. Y. and Xie, M. (2004). Planning of step-stress accelerated degradation test. *Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004 - RAMS*, 287–292. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2004.1285462>
- Tobías, P. A. and Trindade, D. (2012). *Weibull distribution. Applied reliability*. CRC Press.
- Wang, K. (2016). Intelligent Predictive Maintenance ( IPdM ) System – Industry 4.0 Scenario. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 113, 259-268. <https://doi.org/10.2495/IWAMA150301>

- Xu, D., Chen, Y. and Kang, R. (2011). Study of accelerated stability test method for quartz flexible accelerometer. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 11(1), 148–156. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2010.2102025>
- Ye, Z.-S., Xie, M., Tang, L.-C. and Shen, Y. (2012). Degradation-Based Burn-In Planning Under Competing Risks. *Technometrics*, 54(2), 159–168. <https://doi.org/10.1080/00401706.2012.676946>
- Zhao, W. and Elsayed, E. (2005). A general accelerated life model for step-stress testing. *IIE Transactions*, 37(11), 1059–1069. <https://doi.org/10.1080/07408170500232396>



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®

