



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABSTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Dr. Humberto Fernández Morán
"Mis luchas son las del Quijote,
batallas que uno pierde, pero
gana la causa".



Política Óptima de Mantenimiento para Intercambiadores de Calor de Placas Soldadas Utilizando la Simulación de Monte Carlo

Julio M. Carrillo Palma 

Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Núcleo Costa Oriental del Lago, Cabimas, Venezuela

Autor de correspondencia: juliomep_1@hotmail.com

<https://doi.org/10.22209/rt.v47a02>

Recepción: 08 junio 2023 | Aceptación: 22 marzo 2024 | Publicación: 08 abril 2024

Resumen

Los intercambiadores de calor de placas soldadas son equipos fundamentales para los procesos de esterilización en la industria farmacéutica, por lo que es crucial diseñar planes de mantenimiento eficaces para evitar fallos que puedan comprometer la confiabilidad de estos procesos. El objetivo de esta investigación fue determinar, mediante la simulación de Montecarlo, una política óptima de mantenimiento para estos intercambiadores. Se utilizó una metodología descriptiva, aplicada y transversal basada en un diseño de campo. Se estudiaron siete intercambiadores de calor en una planta farmacéutica, sirviendo como población y muestra. Los instrumentos de recolección de datos incluyeron la revisión de registros existentes y la validación por expertos. El estudio demostró que la distribución Weibull es una herramienta útil para modelar los tiempos de falla de los intercambiadores y reveló que el tiempo óptimo de reemplazo es de aproximadamente 1,7 años, con un costo mínimo asociado de US\$2.139. Estos hallazgos resultan esenciales para la planificación eficaz del mantenimiento y reemplazo de los equipos, así como para la optimización de los recursos económicos. Sin embargo, se reconoce la necesidad de una muestra más grande y de más datos para reforzar estas conclusiones.

Palabras clave: confiabilidad; costos; distribución Weibull; esterilización.

Optimal Maintenance Policy for Welded Plate Heat Exchangers Using Monte Carlo Simulation

Abstract

Welded plate heat exchangers are fundamental equipment for sterilization processes in the pharmaceutical industry, which is why it is crucial to design effective maintenance plans to avoid failures that may compromise the reliability of these processes. The goal of this research was to determine, through Monte Carlo simulation, an optimal maintenance policy for these exchangers. A descriptive, applied, and cross-sectional methodology based on a field design was used. Seven heat exchangers in a pharmaceutical plant were studied, serving as both population and sample. Data collection instruments included the review of existing records and validation by experts. The study demonstrated that the Weibull distribution is a useful tool for modeling the failure times of the exchangers and revealed that the optimal replacement time is approximately 1.7 years, with an associated minimum cost of US\$2,139. These findings are essential for effective planning of maintenance and replacement of equipment, as well as for the optimization of economic resources. However, the need for a larger sample and more data to strengthen these conclusions is recognized.

Keywords: costs; reliability; sterilization; Weibull distribution.

Política de Manutenção Otima para intercambiadores de Calor de Placas Soldadas Com uso da Simulação de Monte Carlo

Resumo

Os intercambiadores de calor de placas soldadas são equipamentos fundamentais para os processos de esterilização na indústria farmacêutica, por isso é crucial desenhar planos de manutenção eficazes para evitar falhas que possam comprometer a confiabilidade desses processos. O objetivo desta pesquisa foi determinar, através da simulação de Monte Carlo, uma política ótima de manutenção para estes intercambiadores. Utilizou-se metodologia descritiva, aplicada e transversal baseada em desenho de campo. Foram estudados sete intercambiadores de calor em uma planta farmacêutica, servindo tanto como população quanto como amostra. Os instrumentos de coleta de dados incluíram a revisão dos registros existentes e validação pelos especialistas. O estudo demonstrou que a distribuição Weibull é uma ferramenta útil para modelar os tempos de falha dos intercambiadores de calor em uma planta e revelou que o tempo ideal de substituição é de aproximadamente 1,7 anos, com um custo mínimo associado de US\$ 2.139. Estas constatações são essenciais para um planejamento eficaz da manutenção e substituição de equipamentos, bem como para a otimização de recursos econômicos. Contudo, reconhece-se a necessidade de uma amostra maior e de mais dados para reforçar estas conclusões.

Palavras-chave: custos; confiabilidade; esterilização; Distribuição Weibull.

Introducción

La esterilización juega un papel crucial en la producción de medicamentos inyectables estériles, siendo fundamental para garantizar la ausencia de microorganismos y, por ende, la seguridad del paciente, como destacan Hugo y Russell (2004). En este contexto, los intercambiadores de calor desempeñan un papel esencial al mantener la temperatura requerida para una esterilización efectiva, constituyendo un componente clave en este proceso, según Gad (2008). Una disfunción en estos aparatos puede provocar una esterilización deficiente, lo que conlleva a la contaminación de productos, afectando la salud de los consumidores y dañando la reputación y viabilidad financiera de los fabricantes farmacéuticos (Hugo y Russell, 2004). Con el fin de abordar estos retos, este estudio se centró en el desarrollo de una estrategia de mantenimiento óptima para intercambiadores de calor de placas soldadas de una planta farmacéutica, buscando mejorar la fiabilidad, reducir fallos, limitar interrupciones y abaratar costos, tal como se expone en Thulukkanam (2017). En particular, para los intercambiadores de calor de placas soldadas, Xylem Standard Xchange (2018) sugiere una limpieza periódica para prevenir la acumulación de residuos que podrían comprometer su funcionamiento. A pesar de esto, si la limpieza no resulta suficiente, se recomienda el reemplazo del equipo. Sin embargo, estas directrices no contemplan una política de inspecciones detalladas que evalúe la integridad mecánica y facilite la detección precoz de fallos. En esta línea, los criterios establecidos por fabricantes como Brazetek (2012) y DHT Brazed Plate Heat Exchangers (DHT, 2018) resaltan la importancia de la limpieza química, pero omiten la inspección de la integridad mecánica.

Hellier (2020), al igual que otros autores como Jardine y Tsang (2021), señalan que la detección tardía de defectos en equipos estacionarios puede ocasionar fallos recurrentes y costos elevados, donde una estrategia de reemplazo preventivo podría ser más ventajosa. Considerando este contexto, se plantea que el reemplazo preventivo podría ser una solución pertinente. Existen varios métodos para establecer políticas de mantenimiento, como los descritos por Blischke y Murthy (2003) y Reyes-Picknell y Sifonte (2017), que se enfocan en determinar el momento óptimo para el reemplazo, considerando la probabilidad de fallos y los costos asociados para definir de manera óptima dicha acción. Además, Jardine y Tsang (2021) ofrecen un análisis detallado sobre modelos óptimos de reemplazo, distinguiendo entre el deterioro determinista y estocástico de los componentes industriales. Por ejemplo, elementos que se deterioran de manera determinista, muestran una disminución predecible en su rendimiento.

Por otro lado, los componentes que sufren fallos estocásticos, se presentan de manera impredecible y complican las estrategias de mantenimiento. De manera similar, investigadores como Wang y Pham (2006) y Tadj *et al.* (2011), proponen modelos de reemplazo óptimos que incluyen tiempos mínimos de reparación y son aplicables a diversos

tipos de equipos, incluidos los intercambiadores de calor de placas soldadas. No obstante, los modelos sugeridos por estos autores generalmente no toman en cuenta las incertidumbres asociadas con los costos y los impactos de los fallos a lo largo del tiempo (Palmer, 2019). Esto significa que los costos de reemplazo y los impactos en la producción no son estáticos, sino que pueden variar según los productos manufacturados o el momento en que ocurre la falla (Galar *et al.*, 2017). En este marco, Zio (2012) sostiene que el método de simulación Monte Carlo es adecuado para modelar las incertidumbres en sistemas complejos, gracias a su capacidad para simular escenarios que se acercan a la realidad mediante el uso de números aleatorios. La simulación de Monte Carlo ha demostrado ser eficaz en la gestión de incertidumbres, como se evidencia en el estudio de caso realizado por Sembakutti *et al.* (2017), donde se simuló los índices de producción y costos introduciendo un nivel de incertidumbre mediante esta técnica. Por su parte, Ugurlu y Kumral (2019) determinaron una política óptima de reemplazo para brocas de perforación utilizando modelos de reemplazo óptimos combinados con simulación de Monte Carlo, para lograr resultados más realistas.

Finalmente, de acuerdo con lo anterior, el objetivo de esta investigación fue establecer una política de mantenimiento de reemplazo óptima para intercambiadores de calor de placas soldadas utilizando la simulación de Monte Carlo, con el fin de mejorar la confiabilidad del proceso de esterilización en la industria farmacéutica. Este estudio buscó optimizar las políticas de mantenimiento para reducir fallos, minimizar las paradas de producción y abaratar costos, contribuyendo así a la seguridad y eficiencia del proceso de esterilización.

Materiales y Métodos

En la planta farmacéutica objeto de estudio de esta investigación los intercambiadores de calor de placas soldadas se utilizan en el proceso de esterilización (Figura 1). Estos dispositivos emplean placas metálicas para transferir calor entre dos fluidos, logrando una eficiente transferencia de calor y rápidos cambios de temperatura (Zohuri, 2015).



Figura 1. Intercambiador de calor de placas soldadas (modificado de Energy Dais, 2023).

Para determinar el tiempo óptimo de reemplazo de los intercambiadores de calor, la investigación siguió el método de Ugurlu y Kumral (2019) en tres etapas: primero, se estableció la distribución de probabilidad de fallos usando la distribución de Weibull. Luego, se calculó el tiempo óptimo de reemplazo para balancear los costos de mantenimiento y fallos. Finalmente, las incertidumbres en la probabilidad de fallo y costos de mantenimiento se manejaron mediante la simulación de Monte Carlo, facilitando una política de mantenimiento eficiente.

Tipo y diseño de la investigación

La investigación desarrollada fue de campo, ya que se recolectaron los datos directamente en el lugar del fenómeno estudiado (Sabino, 2014). Además, fue de tipo descriptiva, ya que se analizó la situación actual con el propósito de proponer mejoras. Asimismo, el estudio se clasificó como investigación aplicada, ya que su objetivo fue

resolver un problema a corto plazo (Chávez Alizo, 2007). Igualmente, se identificó como un estudio transversal, en el cual se recolectaron datos en un único punto en el tiempo para describir y analizar las variables de interés (Hernández Sampieri *et al.*, 2006).

Población y muestra

La población de la investigación incluyó siete intercambiadores de calor de placas soldadas en una planta farmacéutica, de acuerdo con la definición de población de Chávez Alizo (2007). La muestra también se enfocó en estos mismos intercambiadores, conforme a la concepción de muestra de Sabino (2014).

Técnica e instrumento de recolección de datos

La recolección de datos se basó en el análisis de datos secundarios (Babbie, 2020), examinando registros de fallas de los intercambiadores de calor de cuatro años del Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado. Se extrajeron datos de órdenes de trabajo urgentes y de emergencia, incluyendo información censurada de equipos sin fallos al momento de la recolección. Para confirmar la veracidad de los datos, se realizó una validación experta con cuatro supervisores, dos de mantenimiento y dos de operaciones (Creswell y Creswell, 2018).

Distribución de probabilidad de los tiempos de falla

La distribución de probabilidad de fallas es clave en la política de reemplazo óptimo, y la distribución de Weibull es comúnmente utilizada para el análisis de datos de vida debido a su flexibilidad y relación con las tasas de falla (O'Connor y Kleyner, 2012). Los parámetros de esta distribución se estimaron a través de la máxima verosimilitud (Mohd Iqbal *et al.*, 2022). La función de densidad de probabilidad de Weibull, $f(t)$, y los parámetros de escala, $\alpha > 0$, y forma, $\beta > 0$, se definen en la Ecuación 1. La función de verosimilitud, L , en la Ecuación 2, se usó para estimar los parámetros maximizando esta función o su logaritmo (Mohd Iqbal *et al.*, 2022):

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

Donde: $f(t)$ es la función de densidad de probabilidad de Weibull. El parámetro de escala, $\alpha > 0$ y de forma parámetro, $\beta > 0$:

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i; \hat{\theta}) \quad (2)$$

Donde: n es una muestra de tamaño obtenida a partir de una función de densidad de probabilidad $f(x, \hat{\theta})$ y $\hat{\theta}$ un parámetro desconocido (Mohd Iqbal *et al.*, 2022).

Para estimar los parámetros de forma (β) y escala (α) de la distribución de Weibull de la Ecuación 1, usando el método de máxima verosimilitud (Ecuación 2), se siguió un proceso iterativo basado en derivadas y log-verosimilitud. Para este estudio se utilizó el programa Minitab versión 20.2 para calcular los parámetros de la distribución de Weibull (Pochampally y Gupta, 2016).

Por otra parte, la prueba de Anderson-Darling (AD) permite evaluar la concordancia de los datos observados con una distribución teórica, en este caso la de Weibull (Montgomery, 2013). El estadístico de prueba, AD, se calculó con la Ecuación 3, donde n es el tamaño de la muestra y $F(x)$ la función de distribución acumulada de la i -ésima muestra. El valor crítico de AD, obtenido de la tabla de distribución de Anderson-Darling para un nivel de significación de $\alpha = 0,05$, permitió confirmar o rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen la distribución de Weibull:

$$AD = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) [\ln F(x_i) + \ln (1-F(x_{n-i+1}))] \quad (3)$$

Además, se validó el modelo de probabilidad mediante inspección visual de la gráfica de probabilidad, que contrasta los datos observados y los esperados según la distribución seleccionada (Lawless, 2011).

Cálculo del tiempo óptimo de reemplazo

Reyes-Picknell y Sifonte (2017) propusieron un modelo para calcular el tiempo óptimo de reemplazo (Ecuaciones 4, 5 y 6), incorporando variables como el costo por unidad de tiempo, costos de reemplazo preventivo y correctivo, y la probabilidad de que la falla no ocurra hasta un determinado tiempo (Ecuación 7). Los supuestos clave de este

modelo incluyen una tasa de falla constante, el reemplazo perfecto y que los intercambiadores de calor puedan ser reemplazados con unidades nuevas o reconstruidas:

$$\text{CPUT preventivo} = \frac{C_p * R(t)}{\int_0^t R(t) dt} \quad (4)$$

$$\text{CPUT correctivo} = \frac{C_u * [1 - R(t)]}{\int_0^t R(t) dt} \quad (5)$$

$$\text{CPUT total} = \text{CPUT preventivo} + \text{CPUT correctivo} \quad (6)$$

Donde: CPUT es costo por unidad de tiempo, C_p el costo de reemplazo preventivo, C_u el costo de reemplazo correctivo, $R(t)$ la probabilidad de que la falla no ocurra hasta el tiempo t . $\int_0^t R(t) dt$ se calculó con la Ecuación 7:

$$\int_0^t R(t) dt \approx \Delta R(\Delta) + \Delta R(2\Delta) + \Delta R(3\Delta) + \dots + \Delta R(n\Delta) \quad (7)$$

Donde: ΔR representa la confiabilidad acumulada hasta tiempo t y Δ es un fragmento de tiempo infinitesimal.

Consideraciones de incertidumbre utilizando la simulación de Monte Carlo

La simulación de Monte Carlo, descrita por O'Connor y Kleyner (2012), se utilizó para abordar la incertidumbre en el modelo, evaluándolo iterativamente con conjuntos de números aleatorios. Este método se aplicó para considerar la incertidumbre en la probabilidad de falla, los costos de reemplazo y el mantenimiento correctivo no planificado. Se determinó el número de ejecuciones de simulación para lograr la precisión requerida utilizando la ecuación 8:

$$m = \frac{Z_{\alpha/2} * \sigma / \mu}{Er(\mu) / \mu} \quad (8)$$

Donde: m es el número de ejecuciones de la simulación, $Er(\mu)$ el error estándar de la media, $\alpha = 1 - C$, C el nivel de confianza, $Z_{\alpha/2}$ la estadística normal estándar, σ la desviación estándar de la salida y μ la media aritmética.

Resultados y Discusión

Durante la investigación se encontró que los intercambiadores de calor de placas soldadas se inspeccionaban semestralmente, pero su diseño y tamaño presentaban desafíos para la detección de defectos, lo que resultaba en fallos repetitivos con afectación de la confiabilidad del proceso de esterilización. En general, los fallos en estos intercambiadores podrían ser causados por diversos factores, como: corrosión, fatiga, ensuciamiento, choque térmico, entre otros (Wang *et al.*, 2007). Cuando los defectos no son detectados a tiempo se producen fallos recurrentes y costos elevados (Hellier, 2020); por lo tanto, se seleccionó una estrategia de reemplazo preventivo por ser la más recomendable para el escenario descrito (Jardine y Tsang, 2021).

Distribución de la probabilidad de falla de los intercambiadores de calor

Con este análisis se estudió la distribución de tiempos de falla de los siete intercambiadores de calor de placas soldadas utilizados en esterilización, aplicando la distribución Weibull. Los datos incluyen fallas y datos censurados a la derecha, correspondientes a intercambiadores con tiempo de falla desconocido, esenciales para optimizar las estimaciones de confiabilidad (O'Connor y Kleyner, 2012). Se usaron datos de cuatro años, resumidos en la Tabla 1, proporcionando una perspectiva integral de las fallas en los intercambiadores examinados.

A continuación, se calcularon los parámetros de la distribución de Weibull utilizando los datos de falla presentados en la Tabla 1 y las Ecuaciones 1 y 2. Para realizar estos cálculos, se usó el programa estadístico Minitab versión 20.2, siguiendo el enfoque propuesto por Pochampally y Gupta (2016). Como resultado de estas operaciones se obtuvo la distribución de probabilidad de fallas de los intercambiadores de calor, la cual se muestra en la Figura 2. Los tiempos de fallo estuvieron en el intervalo de confianza del 95 %, indicando la idoneidad de la distribución de Weibull (Pochampally y Gupta, 2016). La prueba de Anderson-Darling confirmó la bondad del ajuste a la distribución de Weibull ($AD = 0,572$, $\text{valor-P} = 0,125$), según Lawless (2011). Sin embargo, se observa que la adición de más datos

de falla mejoraría la precisión y fiabilidad del análisis, reiterando la necesidad de recopilar datos durante un período más largo (Lawless, 2011). De igual manera, con el uso del programa estadístico Minitab versión 20.2, se obtuvieron los parámetros de forma y escala de la distribución de Weibull, los cuales se detallan en la Tabla 2.

Tabla 1. Datos de falla y tiempos censurados de los intercambiadores de calor.

Intercambiador de calor (identificador único)	Tiempo para la falla (años)	Tipo de data (falla o censurado)
HE #1	4,16	Falla
HE #2	3,36	Falla
HE #1	2,95	Falla
HE #2	0,31	Censurado
HE #3	3,66	Censurado
HE #4	3,66	Censurado
HE #5	2,40	Censurado
HE #6	6,13	Censurado
HE #7	6,13	Censurado

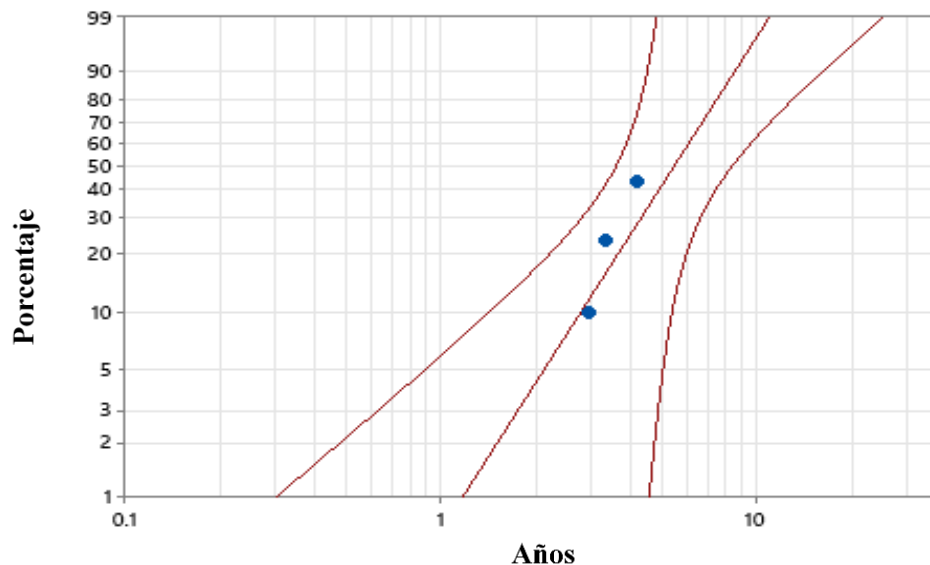


Figura 2. Curva de probabilidad Weibull de los datos de fallo de los intercambiadores de calor con 95 % de intervalo de confianza.

Tabla 2. Parámetros de la distribución Weibull para los intercambiadores de calor.

Parámetro	Valor estimado	Error estándar	Intervalo de confianza (95,0 %)	
			Inferior	Superior
Forma	2,73174	1,25242	1,11222	6,70951
Escala	6,30760	1,49831	3,95976	10,0475

El parámetro de forma estimado fue de 2,73174 (Tabla 2), un valor superior a 1. Según Nelson (2004), este resultado sugiere una tendencia creciente en el riesgo de falla a medida que avanza el tiempo, lo que se relaciona con la fase de “desgaste” en el ciclo de vida del equipo. En términos prácticos, esto significa que los intercambiadores de calor tienen una mayor propensión a fallar a medida que su periodo de operación se extiende. Por su parte, el parámetro de escala mostrado en la Tabla 2, también conocido como parámetro Eta, se estimó en 6,30760. Según Abernethy (2006), el cual se interpreta como el tiempo de vida característico de los intercambiadores de calor. Es decir, en promedio, se espera que estos equipos tengan un tiempo de vida de 6,30760 unidades de tiempo antes de presentar

una falla. No obstante, se debe enfatizar que este valor es una media y el tiempo de vida real de cada intercambiador puede variar debido a distintos factores (Nelson, 2004).

Las estimaciones de los parámetros mencionados están acompañadas de medidas de incertidumbre (Tabla 2), como el error estándar y el intervalo de confianza del 95 % (IC), las cuales ofrecen una idea de la variabilidad inherente en las estimaciones de los parámetros. El intervalo de confianza, específicamente, proporciona un rango en el que se espera que resida el valor verdadero del parámetro con una confianza del 95 % (Montgomery, 2013). Para el parámetro de forma, este rango se extiende desde 1,11222 hasta 6,70951, mientras que, para el parámetro de escala, el intervalo varía desde 3,95976 hasta 10,0475. Aunque estos rangos parecen extensos, lo cual indica cierto grado de incertidumbre en las estimaciones, la información adquirida a través de este análisis es de considerable valor para entender el comportamiento de los intercambiadores de calor y tomar decisiones informadas acerca de su mantenimiento y reemplazo (Meeker y Escobar, 1998).

En cuanto a los parámetros adicionales estimados de la distribución de Weibull aplicada a los tiempos de falla de los intercambiadores de calor y las medidas descriptivas de la distribución estimada, se presenta el tiempo promedio para fallar (TPPF), Tabla 3, que es una medida de la confiabilidad de un sistema (O'Connor y Kleyner, 2012). En este caso, se estimó que el TPPF para los intercambiadores de calor era de aproximadamente 5,61. Esta cifra indica que, en promedio, se puede esperar que un intercambiador de calor falle después de aproximadamente 5,61 años (O'Connor y Kleyner, 2012). La desviación estándar, por su parte, proporciona una medida de la variabilidad en los tiempos de falla (Meeker y Escobar, 1998); un valor de 2,22 indica que hay una considerable variabilidad en el tiempo que los intercambiadores de calor pueden funcionar antes de fallar. Esta variabilidad puede deberse a diferentes factores según Nelson (2004), entre los que se incluyen: diferencias en las condiciones de operación, variaciones en la calidad de la fabricación, el mantenimiento y la instalación, así como la influencia de eventos imprevistos o aleatorios. Por lo tanto, esta variabilidad subraya la necesidad de tener en cuenta estos factores al planificar estrategias de mantenimiento y reemplazo (Nelson, 2004). Adicionalmente, la media de los tiempos de falla es similar al TPPF (Tabla 3), pero puede ser diferente si la distribución de los tiempos de falla es asimétrica. En este caso, la media también es de alrededor de 5,52, lo que está muy cerca del TPPF, sugiriendo que la distribución de los tiempos de falla podría ser bastante simétrica. Esto además implica una consistencia en el rendimiento de los intercambiadores de calor a lo largo del tiempo. Esta simetría puede ser de gran ayuda en la planificación eficaz del mantenimiento y reemplazo de los equipos (O'Connor y Kleyner, 2012).

Tabla 3. Parámetros de la distribución de Weibull para falla de los intercambiadores de calor.

Estadístico	Valor estimado	Error estándar	Intervalo de confianza (95 %)	
			Inferior	Superior
Tiempo promedio para fallar	5,61152	1,29391	3,57116	8,81763
Desviación estándar	2,21802	1,20950	0,761723	6,45851
Media	5,51563	1,19410	3,60841	8,43093
Primer cuartil (Q1)	3,99751	0,935815	2,52653	6,32493
Tercer cuartil (Q3)	7,10874	1,89844	4,21186	11,9981
Rango intercuartílico (IQR)	3,11122	1,69562	1,06912	9,05394

Los cuartiles presentados en la Tabla 3 son medidas que dividen los datos en cuatro partes iguales (Montgomery, 2013). En este contexto, el primer cuartil (Q1) de aproximadamente 3,99 unidades de tiempo sugiere que el 25 % de los intercambiadores de calor fallarán antes de este tiempo. Del mismo modo, el tercer cuartil (Q3) de aproximadamente 7,11 unidades de tiempo indica que el 75 % de los intercambiadores fallarán antes de este tiempo. Estos cuartiles pueden ser útiles para identificar rangos típicos de funcionamiento y para la planificación del mantenimiento (O'Connor y Kleyner, 2012). El rango intercuartílico (IQR), por su lado, es una medida de la dispersión de los tiempos de falla y puede ser interpretado como el rango dentro del cual cae la mitad central de los datos (Lawless, 2011). Un IQR de 3,11 indica una dispersión moderada en los tiempos de falla, lo que implica una variabilidad considerable respecto al tiempo que pueden funcionar los intercambiadores de calor antes de fallar. Esto podría deberse a factores como diferencias en las condiciones de operación, en la calidad de fabricación, o en los niveles de mantenimiento (McCool, 2012).

En resumen, los resultados obtenidos en este estudio revelan que los parámetros estimados y las características de la distribución Weibull brindan información valiosa sobre la confiabilidad y el comportamiento de estos equipos.

Los hallazgos son consistentes con la literatura existente y respaldan la aplicabilidad de la distribución Weibull en el análisis de vida útil de equipos industriales. Sin embargo, es importante tener en cuenta sus limitaciones, como el tamaño reducido de la muestra y la necesidad de recopilar más datos para fortalecer las conclusiones (Nelson, 2004).

Costos y tiempo de reemplazo óptimo utilizando la simulación de Monte Carlo

Los costos de reemplazo óptimo fueron extraídos, analizados y validados. Se determinó que estos costos dependen de múltiples variables, como el tiempo medio de reparación, el producto en la línea y la experiencia en el turno. Para tener en cuenta la variabilidad de estos costos, se utilizó una distribución triangular con valores mínimo, esperado y máximo, de acuerdo con Yañez *et al.* (2004). En la Tabla 4 se presentan los costos asociados al reemplazo y las fallas de los intercambiadores de calor en dólares estadounidenses (US\$). Se observó que el costo preventivo varía entre US\$1.600 y US\$3.000, mientras que el costo correctivo oscila entre US\$30.000 y US\$70.000. Estos valores reflejan la heterogeneidad de los costos involucrados en el mantenimiento de los equipos. Estudios anteriores han destacado la importancia de considerar los costos de reemplazo y corrección al realizar un análisis de mantenimiento (Lai, 2007; Jiang *et al.*, 2022).

Tabla 4. Costos preventivos y correctivos de los intercambiadores de calor (dólares estadounidenses).

Costo	Mínimo	Esperado	Máximo
Preventivo	1.600	2.300	3.000
Correctivo	30.000	50.000	70.000

En las estimaciones de los costos y los tiempos de reemplazo óptimos, implementando la simulación de Monte Carlo, se llevaron a cabo 10.000 simulaciones para integrar la incertidumbre y las distribuciones de fallos y costos. Aplicando la Ecuación 8, se determinó que 4.228 simulaciones eran necesarias para lograr un nivel de confianza del 95 % y una precisión del 1 %. Por lo tanto, el número de simulaciones realizadas (10.000) resultó adecuado para el análisis. De esta manera, usando las Ecuaciones 4, 5, 6 y 7 en combinación con los parámetros de la distribución Weibull (Tabla 2) y los valores de la Tabla 3, se pudo determinar del tiempo óptimo de reemplazo. El resumen de los cálculos de este tiempo y los costos asociados, se presentan en la Tabla 5 y Figura 3. Esto permitió definir que el tiempo óptimo para el reemplazo es de 1,7 años, incurriendo en un costo mínimo de US\$2.139. Estos hallazgos proporcionan una referencia útil para la planificación del mantenimiento de los intercambiadores de calor y permiten optimizar el uso de los recursos financieros en este proceso.

Tabla 5. Resumen del tiempo de reemplazo óptimo calculado para los intercambiadores de calor.

Tiempo (años)	CPUT preventivo (US\$)	CPUT correctivo (US\$)	Costo total (US\$)
1	2.289,10	326,07	2.615,17
1,7	1.325,72	813,31	2.139,04
2	1.114,09	1.073,82	2.187,90
3	696,05	2.123,55	2.819,61
4	464,24	3.370,66	3.834,90
5	308,75	4.692,77	5.001,52
6	196,75	5.955,92	6.152,66
7	116,54	7.037,24	7.153,78
8	62,50	7.855,53	7.918,04
9	29,65	8.393,67	8.423,31
10	12,18	8.695,85	8.708,04

CPUT: costo por unidad de tiempo, US\$: dólares estadounidenses. En negrillas se indica el tiempo óptimo para el reemplazo de los intercambiadores de calor.

Mediante el análisis de los datos proporcionados en la Tabla 5 y Figura 3 se pueden observar varias tendencias en los costos de mantenimiento preventivo y correctivo, a lo largo del tiempo. Por ejemplo, el costo por unidad de tiempo (CPUT) para el mantenimiento preventivo muestra una tendencia decreciente a medida que aumenta el tiempo. Este costo se reduce significativamente desde US\$2.289,10 en el primer año hasta US\$12,18 en el décimo año. Esto sugiere que el costo asociado con el mantenimiento preventivo disminuye cuanto más tiempo se opera el intercambiador de calor antes de realizar el mantenimiento preventivo; es decir, si se realizara el mantenimiento preventivo menos frecuentemente (Jardine y Tsang, 2021). En adición, el CPUT para el mantenimiento correctivo

develó una tendencia creciente a medida que aumenta el tiempo. El costo comienza en US\$326,07 en el primer año y se incrementa hasta US\$8.695,85 en el décimo año. Esto indica que, a medida que se retrasa el mantenimiento preventivo, los costos de mantenimiento correctivo aumentan debido a un mayor riesgo de fallo (Jardine y Tsang, 2021). En términos del costo total, el costo mínimo de US\$2.139,04 se alcanza a los 1,7 años.

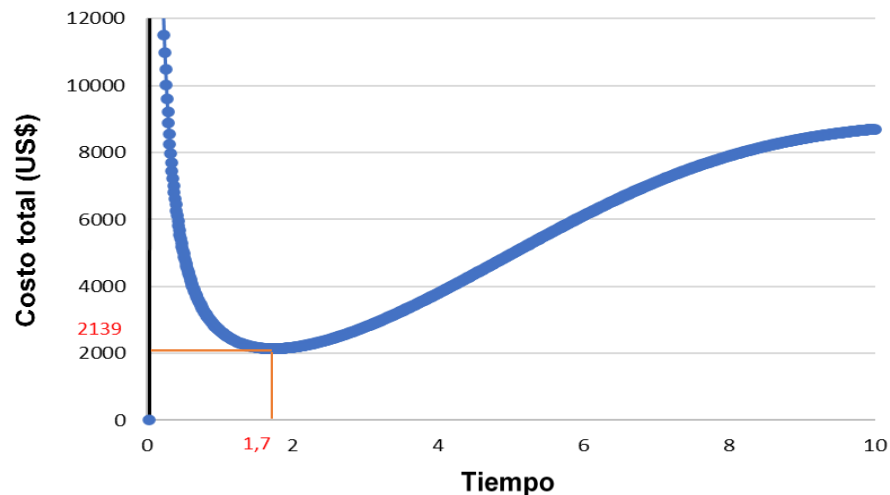


Figura 3. Curva de tiempo de reemplazo óptimo de los intercambiadores de calor. US\$: dólares estadounidenses. En rojo se indica el tiempo óptimo para reemplazar los intercambiadores de calor, el cual constituye el mínimo costo total.

Por lo tanto, el tiempo óptimo de reemplazo para los intercambiadores de calor es de 1,7 años. Más allá de este punto, el costo total comienza a aumentar debido al crecimiento más rápido del costo correctivo en comparación con la disminución del costo preventivo (Reyes-Picknell y Sifonte, 2017). Por lo tanto, estos resultados proporcionan una guía valiosa para planificar el mantenimiento de los intercambiadores de calor. Al reemplazar los intercambiadores de calor cada 1,7 años, se puede minimizar el costo total de mantenimiento. Este tipo de análisis ayuda a las empresas a tomar decisiones más informadas sobre cuándo realizar el mantenimiento preventivo para maximizar la eficiencia económica (Dhillon, 2002).

Conclusiones

Este estudio permite concluir que la distribución Weibull es apropiada para modelar los tiempos de falla de los intercambiadores de calor de placas soldadas, con un incremento en el riesgo de fallo sobre el tiempo. Considerar los datos censurados mejora la precisión de las estimaciones de confiabilidad. El análisis de Monte Carlo ayudó a determinar una política óptima de reemplazo de 1,7 años, con un costo mínimo asociado de US\$2.139, lo cual contribuye a una planificación eficaz del mantenimiento y optimización de recursos. A medida que se retrasa el mantenimiento preventivo, los costos de mantenimiento correctivo aumentan debido a un mayor riesgo de fallo. Sin embargo, el estudio tiene sus limitaciones, como el tamaño de muestra reducido, requiriéndose más datos para reforzar las conclusiones. En conclusión, este trabajo presenta un enfoque riguroso y basado en datos para comprender las fallas de los intercambiadores y optimizar las decisiones de mantenimiento.

Referencias Bibliográficas

- Abernethy, R. (2006). *The new Weibull handbook fifth edition, reliability, and statistical analysis for predicting life, safety, supportability, risk, cost, and warranty claims*. North Palm Beach: R. B. Abernethy.
- Babbie, E. R. (2020). *The practice of social research*. 15th edition. Boston: Cengage Learning.
- Blischke, W. R., Murthy, D. N. P. (Eds.) (2003). *Case studies in reliability and maintenance*. Wiley Series in Probability and Statistics. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.

- Brazetek. (2012). *Brazed plate heat exchangers installation and maintenance manual* [en línea] disponible en: <https://www.brazetek.com/docs/pdf/BPHE-installation-operation-and-maintenance-manual.pdf> [consulta: 15 mayo 2023].
- Chávez Alizo, N. (2007). *Introducción a la investigación educativa*. Maracaibo: Gráfica González.
- Creswell, J. W., Creswell, J. D. (2018). *Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. 5th edition. Los Angeles: SAGE Publications, Inc.
- Dhillon, B. S. (2002). *Engineering maintenance: a modern approach*. Boca Raton: CRC Press.
- DHT. (2018). *Brazed plate heat exchangers: installation and maintenance manual* [en línea] disponible en: <https://www.dhtnet.com/wp-content/uploads/2017/01/BP-Manual-revised4.pdf> [consulta: 26 mayo 2023].
- Energy Dais. (2023). *Brazed plate heat exchanger feature* [en línea] disponible en: <https://www.energydais.com/jiawe-palte-heat-exchanger-cold/brazed-plate-heat-exchanger-feature-9579/> [consulta: 21 mayo 2023].
- Gad, S. C. (2008). *Pharmaceutical manufacturing handbook: production and processes*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Galar, D., Sandborn, P., Kumar, U. (2017). *Maintenance costs and life cycle cost analysis*. Boca Raton: CRC Press.
- Hellier, C. (2020). *Handbook of nondestructive evaluation*, 3rd edition. New York: McGraw Hill.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la investigación*. 4^{ta} edición. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Hugo, W. B., Russell, A. D. (2004). *Pharmaceutical microbiology*. 7th edition. Oxford: Blackwell Science.
- Jardine, A. K. S., Tsang, A. H. C. (2021). *Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications*. 3rd edition. Boca Raton: CRC Press.
- Jiang, L., Li, B., Hu, J. (2022). Preventive replacement policy of a system considering multiple maintenance actions upon a failure. *Quality and Reliability Engineering International*, 39(8), 3252-3265.
- Lai, M. T. (2007). A periodical replacement model based on cumulative repair-cost limit. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 23(6), 455-464.
- Lawless, J. F. (2011). *Statistical models and methods for lifetime data*. 2nd edition. Hoboken: John Wiley & Sons.
- McCool, J. I. (2012). *Using the Weibull distribution: reliability, modeling, and inference*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Meeker, W. Q., Escobar, L. A. (1998). *Statistical methods for reliability data*. Wiley Series in Probability and Statistics. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Mohd Ikbal, N. A., Abdul Halim, S., Ali, N. (2022). Estimating Weibull parameters using maximum likelihood estimation and ordinary least squares: simulation study and application on meteorological data. *Mathematics and Statistics*, 10(2), 269-292.
- Montgomery, D. C. (2013). *Introduction to statistical quality control*. 7th edition. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Nelson, W. B. (2004). *Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analyses*. 1st edition. Hoboken: Wiley-Interscience.
- O'Connor, P. D. T., Kleyner, A. (2012). *Practical reliability engineering*. 5th edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd.
- Palmer, R. (2019). *Maintenance planning and scheduling handbook*. 4th edition. New York: McGraw Hill.

- Pochampally, K. K., Gupta, S. M. (2016). *Reliability analysis with Minitab*. 1st edition. Boca Raton: CRC Press.
- Reyes-Picknell, J. V., Sifonte, J. R. (2017). *Reliability centered maintenance – reengineered: practical optimization of the RCM process with RCM-R®*. 1st edition. Boca Raton: CRC Press.
- Sabino, C. (2014). *El proceso de investigación*. 1^{ra} edición. Guatemala: Editorial Episteme.
- Sembakutti, D., Kumral, M., Sasmito, A. P. (2017). Analyzing equipment allocation through queuing theory and Monte-Carlo simulations in surface mining operations. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 8(1), 56-69.
- Tadj, L., Ouali, M.-S., Yacout, S., Ait-Kadi, D. (2011). *Replacement models with minimal repair*. New York: Springer.
- Thulukkanam, K. (2017). *Heat exchanger design handbook (mechanical engineering)*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press.
- Ugurlu, O. F., Kumral, M. (2019). Optimization of drill bit replacement time in open-cast coal mines. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6, 399-407.
- Wang, H., Pham, H. (2006). *Reliability and optimal maintenance*. New York: Springer Science & Business Media.
- Wang, L., Sundén, B., Manglik, R. M. (2007). *Plate heat exchangers: design, applications, and performance*. Southampton: WIT Press.
- Xylem Standard Xchange. (2018). *Instruction manual: brazed plate heat exchangers* [en línea] disponible en: https://www.xylem.com/siteassets/brand/standard-xchange/resources/manual/buffalo_ht_brazed-plate-heat-exchanger_bg_iom-1.pdf [consulta: 26 mayo 2023].
- Yañez Medina, M., Gómez de la Vega, H., Valbuena Chourio, G. (2004) *Ingeniería de confiabilidad y análisis probabilístico de riesgo*. México D. C.: Reliability and Risk Management, S.A.
- Zio, E. (2012). *The Monte Carlo simulation method for system reliability and risk analysis*. London: Springer.
- Zohuri, B. (2015). *Application of compact heat exchangers for combined cycle driven efficiency in next generation nuclear power plants: a novel approach*. Albuquerque: Springer International Publishing.

Editor Asociado: Charles Albert Gutiérrez Mendoza
Departamento de Ingeniería Química Básica de la
Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia
Maracaibo, 4001, Zulia, Venezuela
charles.agm@gmail.com



REVISTA TECNICA

DE LA
FACULTAD DE
INGENIERIA
UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

Volumen 47. Año 2024, Edición continua _____

*Esta revista fue editada en formato digital
y publicada en abril 2024, por el **Fondo
Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia.**
Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
[www.produccioncienti
ficaluz.org](http://www.produccioncienti
ficaluz.org)