



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Modelo de predicción de reclamos de garantía mediante confiabilidad a nivel sistema, con un enfoque a lavadoras residenciales.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de calidad y productividad

Presenta

Ing. José Juan Rodríguez Trejo

Dirigido por

Dra. Aurora Femat Díaz

Dra. Aurora Femat Díaz
Presidente

MI. Javier García Pérez
Secretario

MI. Arturo Escoto García
Vocal

MI. Jesús Esqueda Buenrostro
Suplente

MI. Eric Huerta Manzanilla
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Fecha de aprobación por el Consejo Universitario: Noviembre 2019
México

Dirección General de Bibliotecas UAQ

En memoria a mi abuelito Juan Trejo, que en paz descansa.

Agradecimientos

A Dios, porque todo lo que tengo y todo lo que soy, a ti te lo debo y a ti te lo doy.

A mi mamá, papá y hermano por haberme apoyado en este proyecto, sin ustedes no estaría aquí.

A mi directora de tesis, la Dra. Aurora Femat, por su paciencia, tiempo, consejos y dedicación por más de dos años en este trabajo. Asimismo, al MI Eric Huerta, por darme la oportunidad de participar en la maestría. Les agradezco a ambos por todas sus atenciones y mejorar mi formación académica, profesional y personal.

A los maestros Jesús Esqueda y Arturo Escoto y a la empresa MABE por colaborar y ser punto clave en este trabajo. Gracias por todo su apoyo.

A mis sinodales y profesores de la maestría les agradezco por siempre ir más allá y compartirnos sus experiencias profesionales.

A Joseline, Denise, Marisa y Belén por haberme apoyado en las diferentes etapas de esta tesis.

A Jessica Malfavón por su amistad, apoyo y compañía en los buenos, excelentes y malos momentos desde el primer día del propedéutico.

A mi amigo Puebla por su gran ayuda en estos últimos pasos.

A mi amigo y exjefe José Cervera por brindarme su apoyo antes y durante la maestría.

A mis amigos de generación de maestría Mariela y Gabino que estuvimos juntos hasta la última clase.

A mis compañeros y amigos de toda la maestría por brindarme su apoyo

A Sara por apoyarme y motivarme en su momento.

A la Universidad Autónoma de Querétaro y a la Facultad de Ingeniería por la beca de colegiatura.

Al CONACYT por el gran apoyo de la beca nacional de estudiantes de tiempo completo, con la cual no hubiera sido posible iniciar este proyecto.

Índice general

1. Introducción / planteamiento del problema.....	11
1.1 Introducción	11
1.2 Planteamiento del problema	15
1.3 Justificación	18
2. Antecedentes.	19
2.1 Modelos de confiabilidad	19
2.1.1 <i>Teoría de la confiabilidad</i>	19
2.1.2 <i>Los tiempos a la falla y las censuras</i>	20
2.1.3 <i>Modelos de confiabilidad a nivel componente</i>	22
2.1.4 <i>Distribuciones paramétricas</i>	23
2.1.5 <i>Distribuciones no paramétricas</i>	28
2.1.6 <i>Algoritmos de Machine Learning y Random Forest</i>	28
2.1.7 <i>Confiabilidad a nivel sistema</i>	31
2.2 Consideraciones que deben tener pruebas de tiempo de vida de las lavadoras	32
2.2.1 <i>El ciclo tecnológico</i>	32
2.2.2 <i>Las pruebas de tiempo de vida de las lavadoras</i>	33
2.2.3 <i>Las pruebas de tiempo de vida en una empresa: Mabe</i>	36
3. Hipótesis.....	38
4. Objetivo general.....	38
4.1 Objetivos específicos	38
5. Metodología.....	39
5.1 Metodología para predecir los reclamos de garantía de lavadoras ...39	
5.1.1 <i>Etapa 1. Creación del FTA con datos históricos</i>	40
5.1.2 <i>Etapa 2. Análisis del comportamiento del nuevo producto</i>	44
5.1.3 <i>Etapa 3. Actualización del FTA</i>	48
5.1.4 <i>Etapa 4. Determinación del nivel de confianza de la predicción</i>	48
5.2 Consideraciones de nivel sistema	49
5.2.1 <i>El uso de MTTF en lugar del MTBF en las pruebas de tiempo de vida</i> . 49	
5.2.2 <i>La Información del Service Call Center</i>	52

5.2.3	<i>El uso del AMEF.....</i>	52
5.3	Particularidades de la metodología.....	54
5.3.1	<i>Relación A: La elaboración de la lista de modos de falla en una empresa.</i>	54
5.3.2	<i>Relación B: La creación del FTA con apoyo de un software.</i>	55
5.3.3	<i>Relación C: Desarrollo de pantallas para captura de datos.</i>	57
5.3.4	<i>Relación D: El uso de diferentes funciones y librerías en R.....</i>	57
5.3.5	<i>Relación E. La manera tradicional de estimar los reclamos de garantía y confiabilidad.....</i>	57
6.	Resultados y discusión.....	61
6.1	Resultados	61
6.2	Discusión.....	70
7.	Conclusiones.....	72
8.	Bibliografía	73
9.	Anexos	81
9.1	Lista de modos de falla	81
9.2	Archivos del FTA	92
9.3	Manual de usuario de las pantallas de captura.....	93
9.3.1	<i>Proceso general de las pantallas de captura</i>	93
9.3.2	<i>Acceso a las pantallas.....</i>	94
9.3.3	<i>Navegación y captura de datos en las diferentes pantallas.</i>	96
9.3.4	<i>Código en R de las pantallas de captura.....</i>	107
9.4	Código en R para analizar la confiabilidad de un modo de falla.	110
9.4.1	<i>Código.....</i>	110
9.4.2	<i>Ejemplo de uso de la función</i>	113

Índice de figuras.

Fig. 1 Costo en US por reclamos de garantías.	14
Fig. 2 Curva de la bañera	14
Fig. 3 Tipos de censura.	21
Fig. 4 Diferentes modelos de confiabilidad a nivel componente.	23
Fig. 5 Distribución exponencial.	25
Fig. 6 Distribución lognormal.....	26
Fig. 7 Distribución Weibull con diferentes parámetros.	27
Fig. 8 Simbología del FTA. Fuente: Fault tree handbook with aerospace applications.	32
Fig. 9 Ciclo tecnológico vs Confiabilidad de productos.....	33
Fig. 10 Diagrama de la metodología principal.....	40
Fig. 11 Estructura del FTA del sistema de lavado.....	43
Fig. 12 Descripción detallada de la etapa dos.	45
Fig. 13 Diagrama de proceso de la función	47
Fig. 14 Curva de la bañera, MTTB y MTBF	51
Fig. 15 Uso del MTTF en la prueba de tiempo de vida.	52
Fig. 16 Ejemplo del FTA en Blocksim	55
Fig. 17 Tres pasos para la creación del FTA en Blocksim V7.....	56
Fig. 18 Último paso para la creación del FTA en Blocksim V7	56
Fig. 19 Confiabilidad con la metodología tradicional (nivel componente)	58
Fig. 20 Árbol de fallas de la metodología tradicional (nivel sistema).....	59
Fig. 21 Confiabilidad con la metodología tradicional (nivel sistema).....	60
Fig. 22 Resumen de la lista de modos de falla críticos.	61
Fig. 23 Predicción del WCR del FTA estandarizado.	63
Fig. 24 Curvas de confiabilidad de diferentes modelos del modo de falla A.	64
Fig. 25 Comparativo de las curvas de confiabilidad de diferentes modelos del modo de falla "A".	65
Fig. 26 Predicción del WCR del FTA del nuevo producto.	67

Fig. 27 Porcentaje de aportación de WCR por modo de falla.	68
Fig. 28 Porcentaje de disminución de confiabilidad por modo de falla a diez años.	71
Fig. 29 Proceso de captura de información.	94
Fig. 30 Pantalla "HOME".	96
Fig. 31 Panel lateral de la pantalla "HOME".	97
Fig. 32 Panel superior de la sección de prueba ETP.	97
Fig. 33 Panel superior de la sección de fallas.	98
Fig. 34 Pantalla proyectos.	98
Fig. 35 Pantalla muestras.	99
Fig. 36 Pantalla operaciones.	100
Fig. 37 Pantalla checklist.	101
Fig. 38 Pantalla auditorias.	102
Fig. 39 Pantalla fallas.	103
Fig. 40 Funcionamiento general de las pantallas de captura de Shiny.	107
Fig. 41 Diagrama de bloques int. gráfica	107
Fig. 42 Navegador del script de la interfaz.	108
Fig. 43 Navegador del script de la programación.	109

Índice de Tablas

Tabla 1 Pruebas de confiabilidad de Mabe	36
Tabla 2 Parámetros para prueba de tiempo de vida.	37
Tabla 3 Lista de modos de falla con su componente y subsistema.	41
Tabla 4 Concentrado de frecuencias de ocurrencia de falla por modo de falla.	41
Tabla 5 Lista de modos de falla con su nivel de ocurrencia.....	41
Tabla 6 Adaptación de la tabla de ocurrencias del FMEA para equipos de lavado.	42
Tabla 7 Parámetros para prueba de tiempo de vida.	44
Tabla 8 Niveles de ocurrencia de la AIAG	53
Tabla 9 Relaciones particulares de la metodología	54
Tabla 10 Resumen de los resultados del FMEA parcial.	62
Tabla 11 Resultados del FTA estandarizado.	62
Tabla 12 Resumen de los TTFs del nuevo producto.	63
Tabla 13 Parámetros de las funciones paramétricas ajustados a los TTF del modo de falla A.....	65
Tabla 14 Índices de error/ajuste para cada modelo de confiabilidad de cada modo de falla.	66
Tabla 15 Resultados del FTA actualizado.	67
Tabla 16 Obtención de la confiabilidad promedio por componente.	69
Tabla 17 Niveles de confianza de la predicción realizada.	69

Resumen

Los reclamos de garantía de productos generan pérdidas económicas y de confianza en las empresas. Uno de estos indicadores de pérdida es el porcentaje de reclamos de garantía (WCR). Este porcentaje se predice usualmente con modelos de confiabilidad para tomar decisiones que pudieran incrementar la confiabilidad de los productos y reducir el WCR. Las lavadoras residenciales son electrodomésticos que necesitan una alta confiabilidad debido a su costo y complejidad. En la literatura reciente no hay normativas para determinar la confiabilidad en las lavadoras ya que no hay procedimientos en las pruebas de tiempo de vida. En respuesta a dicho problema, algunas empresas desarrollan sus propias pruebas. Sin embargo, se observó que no sea reportado la estimación o predicción de la confiabilidad ni la del WCR en lavadoras. Por lo que, en esta tesis, se presenta una metodología para predecir el WCR en lavadoras residenciales que consiste en cuatro etapas: crear un análisis de árbol de fallas (FTA) con base en datos históricos, analizar el comportamiento de fallas en un nuevo producto, actualizar el FTA con los datos obtenidos del nuevo producto y estimar el nivel de confianza de la predicción. Esta metodología fue aplicada a un caso industrial en la fase de diseño y desarrollo. Un total de 306 modos de falla fueron definidos como críticos y se predijo un WCR de 6.86% con casi 85% de nivel de confianza en la predicción. Finalmente, con los datos obtenidos en la metodología, se dedujo que mitigando tres modos de fallas se podría reducir el WCR hasta un 2.9%. Las ventajas de esta metodología es predecir información para poder tomar decisiones que mejoren la calidad y confiabilidad del producto, lo cual beneficia a las empresas, cliente y el medio ambiente.

Palabras clave

Confiabilidad, Lavadoras, Reclamos de garantía; Random Forest; Minería de datos; Análisis de árbol de fallas.

Abstract

The companies must be aware of warranty claims of its products since these generate economic and brand prestige losses. The KPI to measure these losses is the warranty claim rate (WCR). Reliability models that obtain data for guide actions usually estimate this rate. The actions have the purpose of increment the reliability and quality of products and decrease the WCR. The home appliances usually are reliable due their costs and components, as example, the residential washing machines. The current literature has no guidelines to estimate the reliability of the washers since there are no standardized procedures for lifetime tests. In response of this, some private laboratories have developed their own procedures. Although, the reliability estimation of washer has not been reported. In this paper, we present a model to predict WCR for residential washers that consists of four steps: develop a fault tree analysis (FTA) with a customer claims database, analyze the trend of failure modes in new products, update the FTA with data obtained from lab test and calculate the confidence level of the model. The FTA created can be reused for future redesigns. This thesis was applied to an industrial's case in the design and development phase. The results indicate that 306 failure modes were considered as critical and the WCR was 6.86% with 85% of confidence level. Finally, with the data obtained was possible to deduce that three failure modes could reduce the WCR up to 2.9%. The advantage of the model is to get information for make decisions that improve the quality of product, which benefits the stakeholders of supply chain of the washing machines.

Keywords

Reliability; Washing Machines; Warranty Claim Rate; Service Call Rate; Random Forest; Machine Learning.

1. Introducción / planteamiento del problema.

1.1 Introducción

El poder predecir los reclamos de garantía en las etapas de diseño y desarrollo de un producto es una herramienta clave para su desarrollo (Hu & Du, 2019). Los modelos de predicción de garantía pueden estimar la confiabilidad de productos en las etapas de producción, ventas y servicio al cliente (He, Zhang, Jiang, & Bian, 2018). Estos modelos se pueden clasificar en dos tipos, los estadísticos y los de Machine Learning (ML). Los primeros utilizan principalmente modelos de regresión y confiabilidad (X. Wang & Xie, 2018); los de ML emplean diferentes tipos de algoritmos. En algunos casos, los de ML tienen la misma o mejor precisión que los modelos estadísticos (Hariri-Ardebili & Pourkamali-Anaraki, 2018; sHong, Zhang, & Meeker, 2018a; Santhosh, Gopika, Ghosh, & Fernandes, 2018; Singh, Shroff, & Agarwal, 2015; Wu, Zhu, Fan, & Su, 2016).

Los modelos tradicionales de confiabilidad pueden ser deterministas cuando utilizan ecuaciones establecidas por la física, y probabilísticos, cuando utilizan información obtenida en pruebas. Los modelos de confiabilidad tradicionales pueden clasificarse en probabilísticos y deterministas. Los primeros utilizan información obtenida en pruebas, mientras que los últimos utilizan ecuaciones ya conocidas por la física (Hu & Du, 2019). Los modelos probabilísticos se dividen en paramétricos y no paramétricos; los de tipo paramétrico utilizan distribuciones de probabilidad como la Weibull, log-normal, log-logistic, Poisson y exponencial. Los no paramétricos utilizan modelos particulares como el método de Kaplan Meier y la regresión de Cox (He et al., 2018; Moudoub, DeLaux, & Hami, 2018; X. Wang & Xie, 2018).

Los principales modelos de ML aplicados en el área confiabilidad son las redes el *Support Vector Machine* (SVM), el *Random Forest* (RF) y las neuronales artificiales (ANN) (Hong et al., 2018a). Estos métodos se han caracterizado por predecir el desempeño de productos, relacionar las características de los

productos con fallas y determinar el número de reclamo de garantías. (He et al., 2018; Kang et al., 2017). De estos modelos de ML, las ANN han sido las más empleadas; no obstante, el RF ha obtenido mejor precisión que los demás métodos (Alsina, Chica, Trawiński, & Regattieri, 2018).

Usualmente los modelos de confiabilidad se aplican en componentes, pero no es tan común la interacción de estos en conjunto, es decir, a nivel sistema (X. Wang & Xie, 2018). En la confiabilidad a nivel sistema, se ha utilizado diferentes métodos como el análisis de riesgos en fallas (Hamza & Hacene, 2019; Zhao et al., 2019), el *Fault Tree Analysis* (FTA) con otras herramientas como la confiabilidad en redes (Huang, Aslett, & Coolen, 2018; Kabir, Yazdi, Aizpurua, & Papadopoulos, 2018), el análisis de ocurrencias de eventos (Ünver, Gürgen, Sahin, & Altin, 2019) y los modelos de ML (Khakzad, Khan, & Amyotte, 2011).

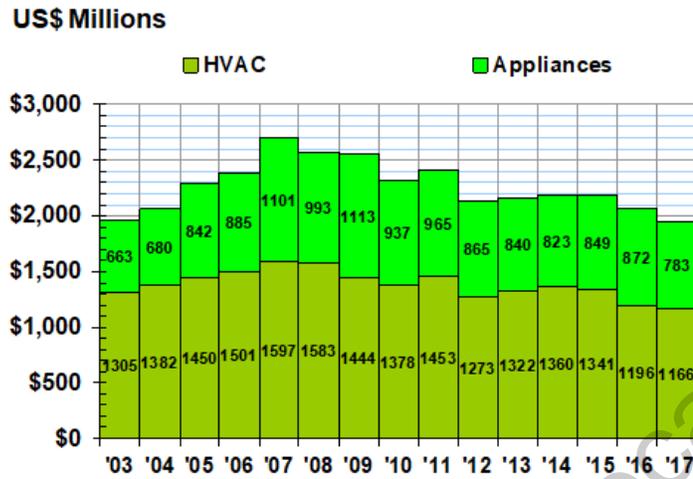
La forma convencional de calcular la confiabilidad a nivel sistema es utilizando el FTA y con el análisis del modo y efecto de la falla (AMEF). Adicionalmente, estos modelos en conjunto pueden estimar la confiabilidad en distintos niveles del producto (da Silva & de Carvalho, 2019) mediante los criterios de evaluación del AMEF (Peeters, Basten, & Tinga, 2018) y analizando los datos de pruebas de tiempo de vida (Yadav, Singh, & Goel, 2006).

En este sentido, en electrodomésticos existen estudios de análisis de falla (Chandran, Sunderland, & Malabika, 2018; Kang et al., 2017; Ku, 2017), confiabilidad en componentes (Alnujaimi, Abido, & Almuahini, 2018; Stamminger, Tecchio, Ardente, Mathieux, & Niestrath, 2018) y desempeño en componentes electrónicos (Althaher, Mancarella, & Mutale, 2015; Johar, Fakieh, Allagani, & Qaisar, 2018; Khan & Zualkernan, 2018; Subbarao, Babu, Satyanarayana, & Naidu, 2018). Lo cual ha permitido aumentar las ventas, reducir los reclamos de garantía y obtener productos más robustos (Bayus, 1992; Ghosh, 2017).

Las pérdidas ocasionadas por los reclamos de garantía se miden mediante índices de perspectiva del cliente llamados Warranty Claim Rate (WCR) y Service

Call Rate (SCR) (Wood, 2001). Por un lado, el WCR funciona para estimar costos por reclamos que las empresas tienen que pagar por fallas dentro del periodo de garantía. Por el otro lado, el SCR estima la confiabilidad del producto en relación a las fallas que se presentan durante y después de este periodo. Las empresas usualmente realizan acciones para mitigar la tasa de reclamos de garantía mediante estudios de confiabilidad que conducen a pruebas y rediseños del producto.

Una revista especialista en la rama garantías, Warranty Week, realizó un reporte anual de electrodomésticos con más de 40 industrias manufactureras en EUA. El reporte incluye información de las principales manufactureras importantes como Whirlpool o Middleby Corp, pero no incluyen los datos de GE debido a que la división de electrodomésticos fue vendido a la empresa de China "Haier Group". En el reporte se observa que en el 2017 los costos en reclamos de garantía fueron de 783 millones de dólares y el WCR estuvo entre un 1.8% promedio con una desviación estándar de 0.4. La Fig. 1 representa los costos de los reclamos en electrodomésticos y de equipos de climatización respecto al tiempo, en ella se observa como en los últimos años se ha estado reduciendo los reclamos de garantía. Sin embargo, en el reporte se describe que el WCR en electrodomésticos es muy variado debido a la alta variedad de productos y ventas al por menor.



Source: WarrantyWeek

Fig. 1 Costo en US por reclamos de garantías.
Fuente: Warrantyweek

Las industrias, para poder aumentar la calidad del producto y mejorar la satisfacción del cliente postventa, deben de entender el ciclo de vida del producto (Kassner, Gröger, Mitschang, & Westkämper, 2015). En la Fig. 2 se visualiza el cambio de la tasa de fallos en los periodos de garantía y de confiabilidad a través tiempo de vida de un producto. En ella podemos observar que las garantías deben de considerar que al principio hay una alta probabilidad de fallas, que posteriormente disminuye y se estabiliza.

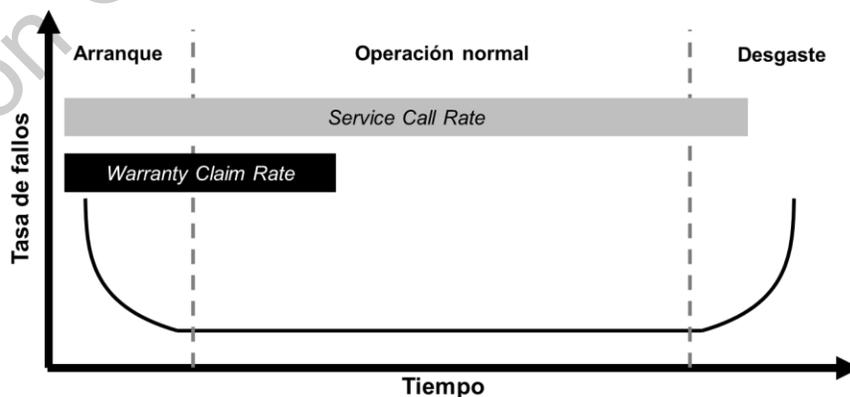


Fig. 2 Curva de la bañera

Los estudios de confiabilidad, satisfacción al cliente y desempeño de algunos componentes se han aplicado en equipos de lavado de tipo residencial. (Althaher et al., 2015; Dong, 2009; Sung, 2017; Tecchio, Stamminger, Ardente, Nistrath, & Mathieux, 2017; Y. Wang, Lu, & Tan, 2018). En los componentes de este tipo de productos ocurren diferentes modos de falla, pero únicamente lo que afecten el WCR o SCR deben de considerar críticos o relevantes para el cliente (Ardente & Mathieux, 2012; Stamminger et al., 2018; Tecchio et al., 2017).

Un método propuesto por Sung (Sung, 2017) para estimar la confiabilidad a nivel componente de una lavadora utiliza herramientas como un FMEA y FTA para conocer la causa raíz de la falla. En dicho trabajo se analizaron 10 frenos de un equipo de lavado en un periodo de 4900 horas de uso. Su metodología consideraba tres etapas clave: el análisis de falla, el test de confiabilidad y el análisis estadístico. Para el test de confiabilidad utilizaron el estándar ISO 1940-1 y en el análisis estadístico utilizaron la distribución Weibull debido a que es la que más se ajusta al comportamiento de los tiempos a la falla (TTF). Esta metodología es funcional, sin embargo solo es aplicable a nivel componente.

1.2 Planteamiento del problema

En las pruebas de confiabilidad, a nivel sistema de equipos de lavado, no existen lineamientos estandarizados en lavadoras según los autores expertos en el área (Ardente & Mathieux, 2012; Stamminger et al., 2018; Tecchio et al., 2017). Por lo que, laboratorios y empresas han generado sus propias pruebas para simular el funcionamiento cotidiano del producto. Existen algunas pruebas normadas o estandarizadas de desempeño como la EN 60456 (Europa), la ANSI/AHAM HLW-1-2007 (EUA, México, Canadá y Chile), la AS/NZS 2040.1:2005 (Nueva Zelanda) y la JIS C 9606 (Japón); las cuales podrían adaptarse a pruebas de confiabilidad.

Uno de los principales problemas en utilizar las pruebas de desempeño como pruebas de confiabilidad, es en determinar la duración de la prueba y su tamaño muestral. Un indicador utilizado para medir el tiempo de uso de los equipos de

lavado es el número de ciclos de lavado (NCL) (Tecchio et al., 2017). Este indicador se ha estandarizado y utilizado para estimar el consumo energético anual (Stamminger et al., 2018). Por ejemplo, las regulaciones europeas utilizan en sus pruebas un NCL de 166 a 295 ciclos para determinar el consumo energético (Boyano Larriba et al., 2017; Stamminger & Schmitz, 2016). Sin embargo, en el área de confiabilidad no hay NCL normalizados. Algunas recomendaciones actuales son utilizar un NCL a 5000 ciclos que equivalen a aproximadamente 20 años de uso (Stamminger et al., 2018; Tecchio et al., 2017) o un NCL variable dependiendo el uso semanal de la lavadora (Hennies & Stamminger, 2016).

La cantidad muestral de las pruebas es directamente proporcional a la confiabilidad requerida. Esto quiere decir que se requiere una alta cantidad de muestras para demostrar una confiabilidad con un nivel de confianza elevados. La fórmula que describe esta proporción se llama "Success run" (Luko, 2010). Para poder reducir el número de muestras, algunos autores han hecho la suposición de que la fallas pueden tienen un comportamiento exponencial y/o gamma (Carruitero, 2011; A. Kleyner, Sandborn, & Boyle, 2004; Andre Kleyner, 2008; Andre Kleyner, Bhagath, Gasparini, Robinson, & Bender, 1997; Andre Kleyner, Elmore, & Boukai, 2015; Luko, 2010; Nelson, 1977; Yadav et al., 2006). Pero, en ciertos casos, la confiabilidad requerida sigue siendo elevada que la cantidad generando una gran cantidad muestral. Por lo que se deben buscar alternativas adicionales a las pruebas de tiempo de vida para estimar la confiabilidad de un producto.

Resumiendo, los métodos recientes que predicen reclamos de garantía emplean modelos de ML y de confiabilidad. La mayoría de electrodomésticos incluyen una garantía, como es el caso de las lavadoras. Estos reclamos podrían estimarse mediante el AMEF, modelos de confiabilidad y el FTA, que son métodos o herramientas a nivel sistema. La literatura menciona que en las lavadoras residenciales se han realizado pruebas de confiabilidad a nivel componente y

sistema. Sin embargo, no se han desarrollado procesos estandarizados para estimar la confiabilidad, el tamaño muestra y el nivel de confianza en este tipo de productos. Asimismo, el alto costo, tiempo requerido y la variedad de componentes, limitan el tamaño muestral de las pruebas de tiempo de vida. Esto genera que las empresas se les dificulte determinar la cantidad de reclamos de garantía de una manera confiable y estandarizada.

Por ende, el propósito de esta tesis es proponer un método para estimar los reclamos de garantía de una lavadora residencial, no únicamente a partir de información de pruebas de tiempo de vida, sino también utilizando análisis de falla a nivel sistema y modelos de confiabilidad con un nivel de confianza establecido.

1.3 Justificación

Las lavadoras residenciales son electrodomésticos de necesidad y/o de lujo en los que, para ser competentes en el mercado, sus fabricantes ofrecen garantía de fábrica por 12 meses en promedio. Esto beneficia al cliente debido a que asegura el funcionamiento de su producto un año. Sin embargo, si el fabricante representa no tiene un producto de calidad, esto genera un costo al que se le llama costo por reclamo de garantía. Predecir estos reclamos de garantía a través de la confiabilidad de la lavadora, puede llevar a obtener información relevante para tomar acciones que mejoren su calidad.

El autor *Rainer Stammering*, autor líder de confiabilidad en electrodomésticos, menciona que no hay suficiente información en la literatura de las pruebas de vida de lavadoras a nivel sistema. Las investigaciones recientes, como la de Sung o Techio, se han enfocado a nivel componente o subsistema limitándose a uno o dos modos de falla. En respuesta a dicho problema, las empresas han generado sus propias pruebas y análisis sin tener un modelo que pueda estimar la confiabilidad de las lavadoras a nivel sistema.

Aunado a esto, los avances de los algoritmos de *Machine Learning* se pueden combinar y juntar con modelos de confiabilidad. Por lo que, se ve la necesidad de combinar las herramientas de confiabilidad a nivel sistema con los modelos previamente mencionados para predecir los reclamos de garantía.

2. Antecedentes.

Los antecedentes se dividen en dos temas principales, los modelos de confiabilidad con un enfoque a nivel sistema y las consideraciones que deben tener las pruebas de tiempo de vida de las lavadoras.

2.1 Modelos de confiabilidad

2.1.1 Teoría de la confiabilidad

Los productos, sean componentes o sistemas, presentan fallas. Un componente es un elemento que forma parte de un conjunto y tiene una función. Un sistema es un conjunto de componentes coordinados que llevan a cabo una o varias funciones en común. Un producto puede resistir cambios en condiciones adversas, pero cuando uno de estos cambios sobrepasa la capacidad de resistencia del producto, se produce una falla. Los dos factores principales en las fallas son el “stress” y el tiempo. El “stress” puede ser causado por fuerzas mecánicas, químicas, eléctricas, térmicas y de radiación (M Modarres, Kaminskiy, & Krivtsov, 2016). El análisis económico y de ingeniería, que considera los factores de las fallas dentro del diseño y manufactura, se llama de confiabilidad.

La confiabilidad es la habilidad de un producto para operar sobre ciertas condiciones, durante un periodo de tiempo o número de ciclos previamente definidos. Esta habilidad puede verse desde un punto de vista determinístico y probabilístico; por ejemplo, de manera determinística se identifican las causas de “stress” y probabilísticamente se trata el tiempo y stress como variables aleatorias (Mohammad Modarres, Kaminskiy, & Krivtsov, 1999).

El análisis de confiabilidad o análisis de supervivencia (en ciencias medicas) va dirigido a componentes o sistemas, estos pueden ser reparables o no reparables. El análisis de productos no reparables, en especial el de componentes, es el más básico debido a que el producto deja de funcionar una vez que se presente una falla. El análisis de productos reparables es complejo y de interés actual (Gurov & Utkin, 2017); debido a que se considera que el producto presenta fallas y estas se

pueden reparar con el fin de mantener las funciones principales del mismo. En la práctica, algunos análisis de sistemas son tratados como componentes debido a su complejidad (M Modarres *et al.*, 2016).

Desde el punto de vista probabilístico, la palabra “habilidad” en confiabilidad se puede sustituir por la palabra “probabilidad”. La definición de confiabilidad se explica en la Ec.1 donde $R(t)$ es la confiabilidad de un producto, t es el tiempo, periodo o ciclos designados en los que un producto opera (tiempo objetivo), T el tiempo acumulado de la prueba por producto y; c_1, c_2, \dots las condiciones o ambientes preasignados. Para casos prácticos, las condiciones son consideradas implícitas, por lo que se reduce la Ec. 1 en la Ec. 2 (M Modarres *et al.*, 2016).

$$R(t) = \Pr(T \geq t | c_1, c_2, \dots) \quad \text{Ec. 1}$$

$$R(t) = \Pr(T > t) \quad \text{Ec. 2}$$

2.1.2 Los tiempos a la falla y las censuras.

Uno de los conceptos más importante en la confiabilidad es el tiempo a la falla o por sus siglas en ingles *Time To Failure* (TTF). Este se define como el tiempo en el que un componente o sistema presenta una falla y deja de funcionar correctamente. Los TTFs se obtienen de pruebas de tiempo de vida, las cuales consisten en evaluar el funcionamiento de los componentes de acuerdo a un tiempo específico. Los modelos estadísticos utilizan los TTFs para describir o predecir la confiabilidad, y consisten en ajustar los TTFs a una distribución estadística para obtener los parámetros de dicha distribución. Las distribuciones más comunes son la exponencial, la normal y la Weibull. (Alsina *et al.*, 2018; M Modarres *et al.*, 2016)

El proceso de detección de fallas y la obtención de TTFs es difícil, costoso, y en algunos casos se desarrolla con información incompleta. La obtención de datos

incompletos ocurre cuando un producto sigue operando después de una prueba o cuando se desconoce el inicio de operación de un producto; a estos casos se les llama “datos censurados” y existen tres tipos, a la derecha, a la izquierda y por intervalos.(Alsina *et al.*, 2018; Gurov & Utkin, 2017; Hong, Zhang, & Meeker, 2018b; Liu & Peng, 2017; M Modarres *et al.*, 2016; Tecchio *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2016).

En la Fig. 3 se observan los registros de fallas de cuatro muestras con los tres tipos de censura. La censura por la derecha es usada cuando un producto sigue funcionando después de que termine la prueba de tiempo de vida. La censura por la izquierda es empleada cuando se desconoce el inicio de la prueba de tiempo de vida del producto. Finalmente, la censura por intervalos sirve en pruebas de tiempo de vida, donde se realizan inspecciones periódicas y se desconoce el tiempo exacto de la falla (Alsina *et al.*, 2018).

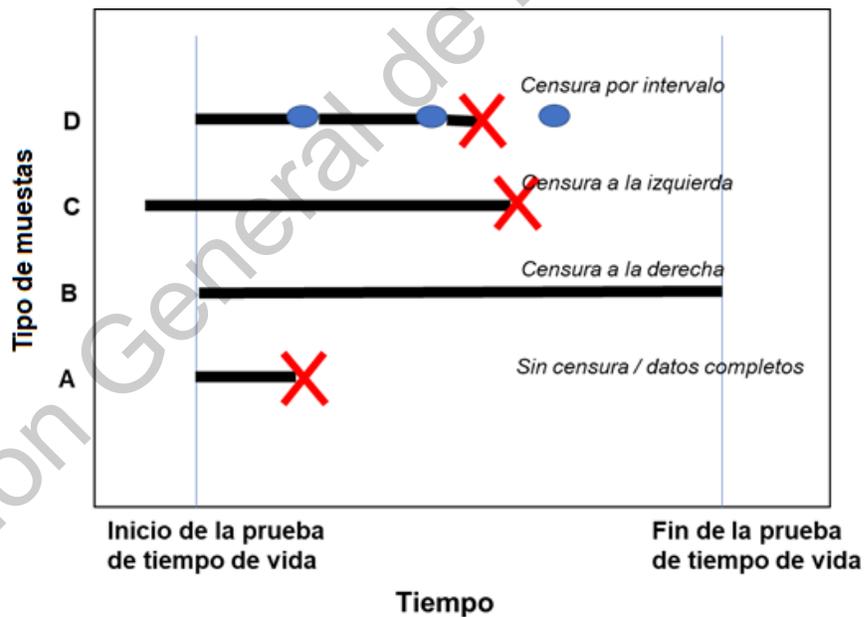


Fig. 3 Tipos de censura.

2.1.3 Modelos de confiabilidad a nivel componente.

La forma más básica de analizar la confiabilidad de un producto es a nivel componente. En los componentes existen dos tipos de estudio de confiabilidad, los reparables y no reparables. Los estudios con respecto a los reparables son realizados principalmente en el área de mantenimiento, mientras que, se utilizan los no reparables en el diseño de productos. Debido a la naturaleza del producto de este trabajo, se tiene un enfoque en productos no reparables.

El análisis de componentes no reparables con un solo modo de falla y con censura a la derecha o con datos completos es la base para cualquier estudio de confiabilidad. El cual se estructura en tres pasos: realizar una prueba de tiempo de vida al producto, anotar los TTF y encontrar un modelo de confiabilidad que describa y/o pronostique los modos de falla del producto (Alsina *et al.*, 2018; Yadav *et al.*, 2006).

En la Fig. 4 se muestran algunos de los tipos de modelos que existen en el análisis de confiabilidad a nivel componente. En este trabajo se emplearán tres modelos, esto son las distribuciones paramétricas, una no paramétrica y un algoritmo de ML. Existen más distribuciones y algoritmos, pero los que se utilizan en esta tesis son los más recomendados por la literatura por su precisión y por el tipo de aplicación.

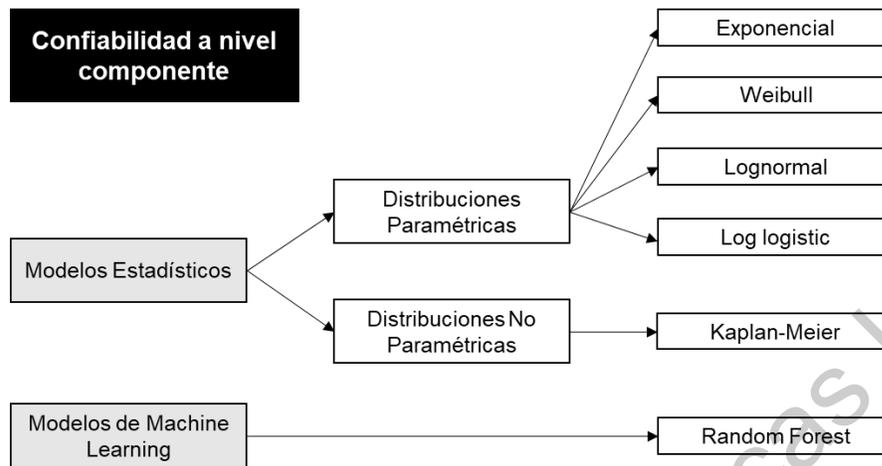


Fig. 4 Diferentes modelos de confiabilidad a nivel componente.

2.1.4 Distribuciones paramétricas

Uno de los métodos clásicos para calcular la confiabilidad es por medio de distribuciones probabilísticas paramétricas; las más usadas han sido la exponencial, lognormal y de Weibull. La distribución exponencial fue la primera en usarse para modelar el TTF y es utilizada en algunos artículos como apoyo para explicar otros modelos (Mohammad Modarres *et al.*, 1999; Nassar & Ashour, 2014; L. Wang & Shi, 2013).

La distribución exponencial utiliza un parámetro llamado lambda λ o razón de falla. Su función de distribución (pdf) se representa en la Ec. 3 donde t es el tiempo que dura la prueba. La estimación del parámetro λ se define en la Ec. 4 donde r es la cantidad de fallas observadas en t y el tiempo acumulado en la prueba es T que se determinará por la Ec. 5. Donde $\sum_{i=1}^r t_i$ representa el tiempo acumulado del número de fallas (r) y $(n - r)t_0$ es el tiempo acumulado de los productos que sobrevivieron; donde n representa el número de productos totales y t_0 el límite superior de tiempo de la prueba o tiempo de censura.

Con el fin de obtener la función de confiabilidad $R(t)$ descrita en la Ec. 6 se integra la función pdf para desarrollar una función acumulativa (cdf) detallada en la Ec. 7.

En la práctica, se usa un valor llamado tiempo medio entre las fallas (MTTF) como indicador y se obtiene con la Ec. 8 (M Modarres *et al.*, 2016).

$$pdf = \lambda \exp(-\lambda t) \quad \text{Ec. 3}$$

$$\lambda = \frac{r}{T} \quad \text{Ec. 4}$$

$$T = \sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_0 \quad \text{Ec. 5}$$

$$R(t) = 1 - cdf \quad \text{Ec. 6}$$

$$cdf = 1 - \exp(-\lambda t) \quad \text{Ec. 7}$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Ec. 8}$$

Una distribución lognormal es aquella en la que los logaritmos de sus variables se encuentran normalmente distribuidos. Recientemente se usó la distribución para explicar modelos con tiempos de fallas acelerados (ATF), monitorear procesos de calidad y determinar la precisión de confiabilidad (Goodarzi, Amiri, & Asadzadeh, 2017; Yang & Cooke, 2018). La función pdf se describe en la Ec. 9, en ella se usan dos parámetros que le dan forma y proporcionalidad a la curva de la distribución. Estos parámetros son μ que representa el promedio del logaritmo de T y σ como la desviación estándar del logaritmo de los datos de T . La función pdf se puede integrar para obtener la función cfd, dando como resultado la Ec. 10 (Mohammad Modarres *et al.*, 1999).

$$pdf = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad \text{Ec. 9}$$

$$cdf = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^1 \exp\left[-\frac{(\theta-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] d\theta \quad \text{Ec. 10}$$

En la Fig. 5 se observa la gráfica de Ec. 3, la cual representa la probabilidad de la función respecto al tiempo en horas; los datos de entrada son los TTFs de un producto con un $\lambda = 10/133720$. En este ejemplo, el tiempo máximo registrado de un TTF fue 6000 horas; pero gracias al uso de la distribución exponencial, se puede predecir el comportamiento de futuras TTF. La Fig. 6 muestra una gráfica de la Ec. 9 con un $\mu = 500$ y un $\sigma = 25$ con el objetivo de observar la forma de la curva lognormal.

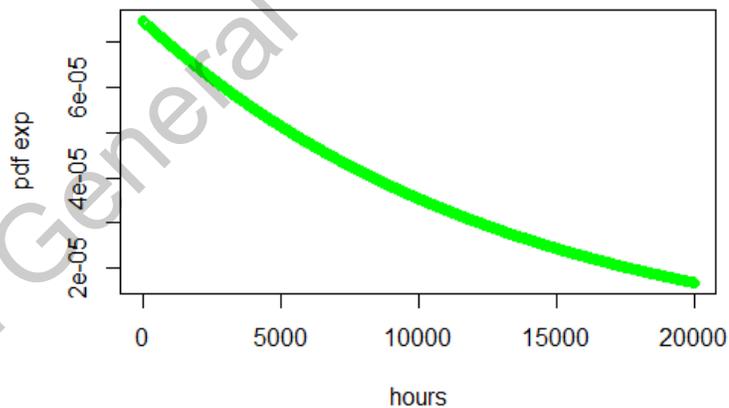


Fig. 5 Distribución exponencial.

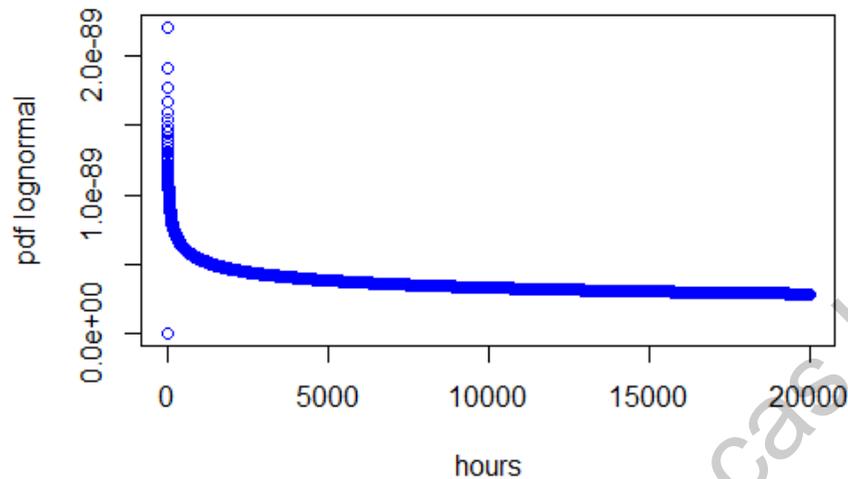


Fig. 6 Distribución lognormal

En algunos trabajos recientes (Alsina *et al.*, 2018; Gurov & Utkin, 2017; He *et al.*, 2018; Hong *et al.*, 2018a; Limon, Yadav, Zuo, Muscha, & Honeyman, 2016; Liu & Peng, 2017; Rocchetta, Li, & Zio, 2015; Santhosh *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2015; Sung, 2017) se menciona y/o usa la distribución Weibull. La cual es una distribución flexible y ajustable a varios comportamientos de TTF, además de ser una de las distribuciones más empleadas en la confiabilidad de sistemas y componentes. La función Weibull maneja dos parámetros principales: β y α . El parámetro β representa la forma de la distribución; por ejemplo, cuando $\beta = 1$ la forma es parecida a la de una distribución exponencial y cuando $\beta > 1$, empieza a tener forma de campana. El parámetro α representa la escala de la forma; por ejemplo, cuando $\beta = 1$ y $\alpha = 1/\lambda$ (λ es igual a la tasa de ocurrencia), se obtiene la distribución exponencial. La Ec.11 representa la distribución pdf de Weibull respecto a tiempo t o número de ciclos. La ecuación para cdf se observa en la Ec. 12. Para obtener la razón de fallas $h(t)$ se utiliza la Ec. 13 y en algunos casos se necesita calcular λ para obtener la razón de fallas $h(t)$, por lo que se utilizan las ecuaciones Ec. 14 y Ec. 15

$$pdf = \begin{cases} \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} * \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right], & t, \alpha, \beta > 0 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad \text{Ec. 11}$$

$$cdf = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad \text{Ec. 12}$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}, \quad t, \alpha, \beta > 0 \quad \text{Ec. 13}$$

$$\lambda = \frac{1}{\alpha^\beta} \quad \text{Ec. 14}$$

$$h(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad \text{Ec. 15}$$

En la Fig. 7 se muestra la forma de la distribución con diferentes parámetros β , la función en color negro representa $\beta = 1$, el rojo $\beta = 0.5$ y el azul $\beta = 7$. Las funciones de color negro y rojo están a una escala de 400, la función azul en una escala de 1100. El eje de las "x" representa el TTF y el eje de las "y" las probabilidades obtenidas de $f(t)$.

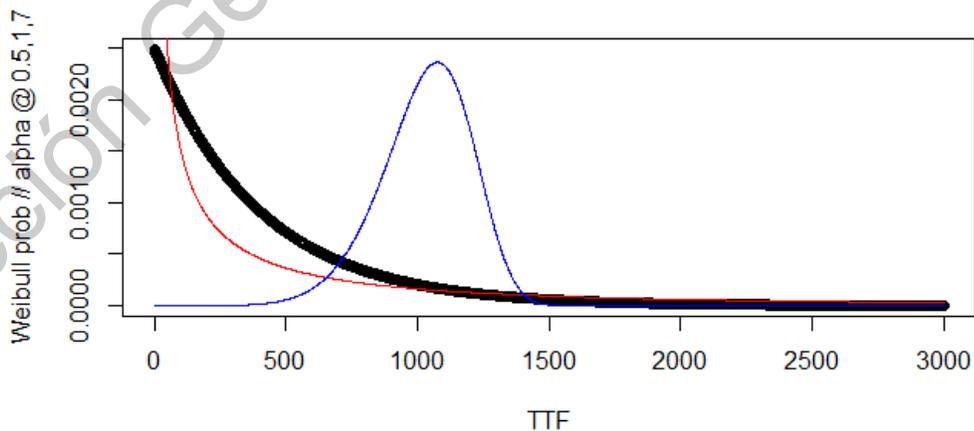


Fig. 7 Distribución Weibull con diferentes parámetros.

2.1.5 Distribuciones no paramétricas.

Son aquellas que no necesitan ser caracterizadas por algún parámetro; su objetivo es estimar de manera directa la confiabilidad de un conjunto de TTFs. La principal ventaja de estas distribuciones es que son útiles para tener resultados preliminares antes de aplicar una función paramétrica. Además, se utilizan cuando los datos no son normales y el número de muestras es pequeño. La desventaja es que tienen una menor precisión que las paramétricas. Por ejemplo, en los análisis de confiabilidad son exactas en los tiempos donde ocurrieron los TTFs, pero si se desea interpolar o extrapolar no son tan exactas como una paramétrica (M Modarres *et al.*, 2016).

Existen varias distribuciones no paramétricas utilizadas en confiabilidad como Kaplan Meier, la regresión Cox, el estimador de Nelson-Allen, entre otras. Para este trabajo se utilizó Kaplan Meier (KM) por su versatilidad para análisis con muestras pequeñas. Esta distribución, también conocida como estimador del producto límite, tiene la característica de permitir censuras en su análisis (Alsina *et al.*, 2018).

En la Ec.16 se observa la ecuación principal de KM, donde t_i es el TTF de una falla, t el tiempo total de la prueba de tiempo de vida, d es el número de fallas en el momento t_i y n_i el número de muestras antes de que ocurra la falla en t_i . En el caso de haber una censura n_i es el número de supervivientes menos el número de casos censurados.

$$KM = \prod_{t_i \leq t} \frac{n_i - d_i}{n_i} \quad \text{Ec. 16}$$

2.1.6 Algoritmos de Machine Learning y Random Forest

En la actualidad, la mayoría de sistemas de ingeniería pueden generar suficiente información para ser usada en un análisis de confiabilidad. El desarrollo del manejo de datos ha logrado avances en pruebas de confiabilidad. El principal de

estos ha sido en el análisis de tiempo de vida y degradación de un producto. Las áreas de oportunidad actuales en la confiabilidad son el análisis de datos de degradación, análisis de covarianzas, aplicaciones de los algoritmos de ML y nuevas aplicaciones emergentes (Hong *et al.*, 2018a). De los algoritmos principales de ML, Alsina menciona que el *Random Forest* (RF) es el que muestra ser más preciso que las redes neuronales artificiales (ANN), la máquina de vectores (SVM) e incluso la distribución Weibull. La condición para que RF tenga la mejor precisión es que se analicen más de 25 TTF.

El RF es un algoritmo que realiza un conjunto de árboles de decisión (DT) que tienen el objetivo de clasificar o predecir los datos. Los DT son estructuras de datos que tienen hojas, raíces, ramas y nodos. La creación de un DT es hecha por algoritmos como C.4.5, ID3 o M5; que procesan la información de una tabla. Para efectuar el RF, varias tablas son formadas a partir de datos extraídos aleatoriamente de una tabla principal, creando y juntando varios DTs (Rodríguez-Trejo & Femat-Díaz, 2018).

El algoritmo RF tiene cuatro parámetros clave; estos son el número de árboles, la precisión, el método de clasificación y el número de atributos. Estos parámetros son clave para conocer a profundidad del modelo. El primero es el número de árboles de decisión a crear, lo recomendable según la literatura es empezar creando 100 árboles. La precisión del modelo es mejor mientras mayor número de árboles contenga, aunque como desventaja, tiene un alto consumo de memoria y mayor tiempo de ejecución (Hartshorn, 2016).

El segundo parámetro es la precisión; esta se obtiene a partir de la validación cruzada conocida como “*Out of the Bag*” (O.O.B). La validación cruzada se encarga de comparar la variable de salida de la información original con el resultado del modelo de predicción. EL O.O.B es el cociente del número de aciertos de la información original entre el número de aciertos de la predicción. Después de calcular este cociente, se determina si es necesario crear más árboles para aumentar la precisión.

En el tercer parámetro, el método de clasificación, se determina que método se van a crear los DTs. Entre estos métodos se encuentra el de *Gini Impurity (GI)* y la entropía. El primero de ellos es el más usado, y hace referencia a la probabilidad de hacer una incorrecta clasificación en el nodo de un árbol, entre menor sea la probabilidad el resultado es mejor. *GI* se define con la Ec. (17); donde p es la probabilidad de tener una observación dentro del conjunto de datos de un nodo. Se recomienda usar *GI* porque usa menos recursos informáticos.

$$Gini = 1 - \sum_j p_j^2 \quad Ec. (17)$$

El segundo método, la entropía, la cual tiene resultados similares al *GI* (*GI*), se define como el grado de desorden que tiene un conjunto de datos. La entropía apoya al DT en la separación de los nodos de una manera eficiente junto con *Mean Decrease Gini (MDG)* para obtener variables significativas de la información. Las variables significativas son aquellos factores que tienen los mayores valores de MDG. No se debe confundir con *GI* con *Gini index*. La Ec. (18) representa la entropía, donde p es la probabilidad de tener una observación dentro del conjunto de datos de un nodo.

$$Entropy = \sum_j -p_j * \log_2 p_j \quad Ec. (18)$$

El cuarto parámetro, que es el número de atributos a escoger, se determina el número de atributos o características a seleccionar aleatoriamente de los datos principales. Esto es con el fin de poder crear varios subconjuntos de información para realizar varios DTs. Se recomienda, en caso de solo realizar un análisis descriptivo, escoger el número de atributos con $m = \sqrt{p}$; donde m es el número de atributos a escoger aleatoriamente del modelo y p es el total de atributos del conjunto inicial de datos. Si se va a realizar una predicción se recomienda usar $m = p / 3$.

RF es un método que analiza de manera general un conjunto de datos; el cual puede ser usado en la manufactura para tener un punto de vista general de un problema, aprovechando los recursos informáticos disponibles. No obstante, si la información disponible es irrelevante o poca, RF se limitará únicamente a identificar variables significativas; por lo que se tendría que analizar estas variables de forma independiente y solucionarlas con herramientas ya conocidas.

2.1.7 Confiabilidad a nivel sistema

En confiabilidad, un sistema es un conjunto de elementos como subsistemas, componentes, software, recurso humano, etc. Este conjunto debe ser visto como si fuera uno para poder determinar su confiabilidad. El análisis de la misma consta de modelar la relación entre los elementos, al mismo tiempo que se interpreta la confiabilidad de cada elemento. La gran variedad de los modelos de confiabilidad se puede aplicar a nivel componente, pero se necesita apoyo de otras herramientas para aplicarse a nivel sistema. El AMEF es la herramienta que más se recomienda para esta aplicación por su forma sistemática de evaluar los criterios de severidad, detección y ocurrencia en los modos de falla (Peeters *et al.*, 2018). Un trabajo de esta índole (Yadav *et al.*, 2006) propone utilizar los modelos de confiabilidad en combinación el AMEF y las pruebas de tiempo para determinar la confiabilidad con cierto nivel de confianza.

El análisis de árbol de falla (FTA) es un método gráfico que se empezó a utilizar en la industria aeroespacial. Esta utiliza operadores lógicos para representar las relaciones entre los eventos y sus fallas. Los operadores lógicos que utiliza son el "AND", "OR" y condicionales, para los eventos tiene utiliza símbolos que se pueden observar en la Fig. 8. Adicionalmente, el FTA puede analizar información cuantitativa como funciones de confiabilidad, de tal modo que con algebra booleana se pueda estimar la confiabilidad de todo un sistema (Ruijters & Stoelinga, 2015).

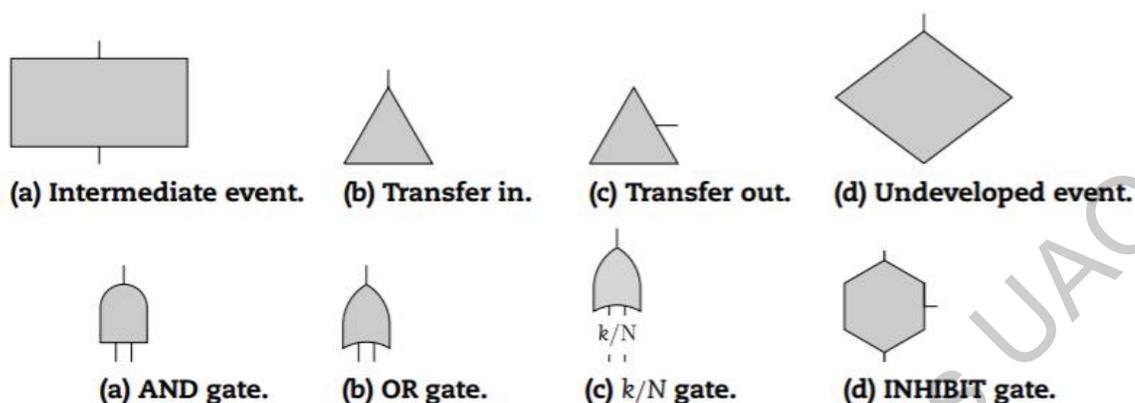


Fig. 8 Simbología del FTA. Fuente: Fault tree handbook with aerospace applications.
Fuentes: (Ruijters & Stoelinga, 2015).

El análisis del modo y efecto de la falla (AMEF) es un método cualitativo que consiste en identificar y enlistar potenciales modos de falla con el fin de prevenirlos y mitigar el riesgo de su ocurrencia. Este método se usó por primera vez en 1940 por la milicia del gobierno de EU y actualmente es utilizada principalmente por la industria automotriz y aeronáutica. Asimismo, dicho método es sistemático y necesita un equipo multidisciplinario para identificar la mayor cantidad de modos, efectos y causas de fallas. La manera de cuantificar dicho análisis es por medio de la calificación de valores de severidad, ocurrencia y detección; estos valores se multiplican para obtener el número de riesgo prioritario (NPR) que sirve para tomar acciones preventivas en el producto o proceso (da Silva & de Carvalho, 2019; Peeters *et al.*, 2018)

2.2 Consideraciones que deben tener pruebas de tiempo de vida de las lavadoras

2.2.1 El ciclo tecnológico

Un producto puede tener una alta confiabilidad, pero a veces su ciclo tecnológico puede ser diferente debido al mercado, la innovación tecnológica y/o la obsolescencia programada (Hennies & Stamminger, 2016). Los estudios de confiabilidad deben enfocar a productos a tener un ciclo tecnológico largo. Existen

tres tipos de producto, los de alta tecnología o nueva economía, los bienes durables y los productos comerciales. La Fig. 9 muestra algunos tipos de producto dependiendo del tiempo de su ciclo tecnológico con su tiempo de desgaste o uso final. El conocer el ciclo tecnológico de un producto ayuda en determinar la importancia de la confiabilidad del mismo.

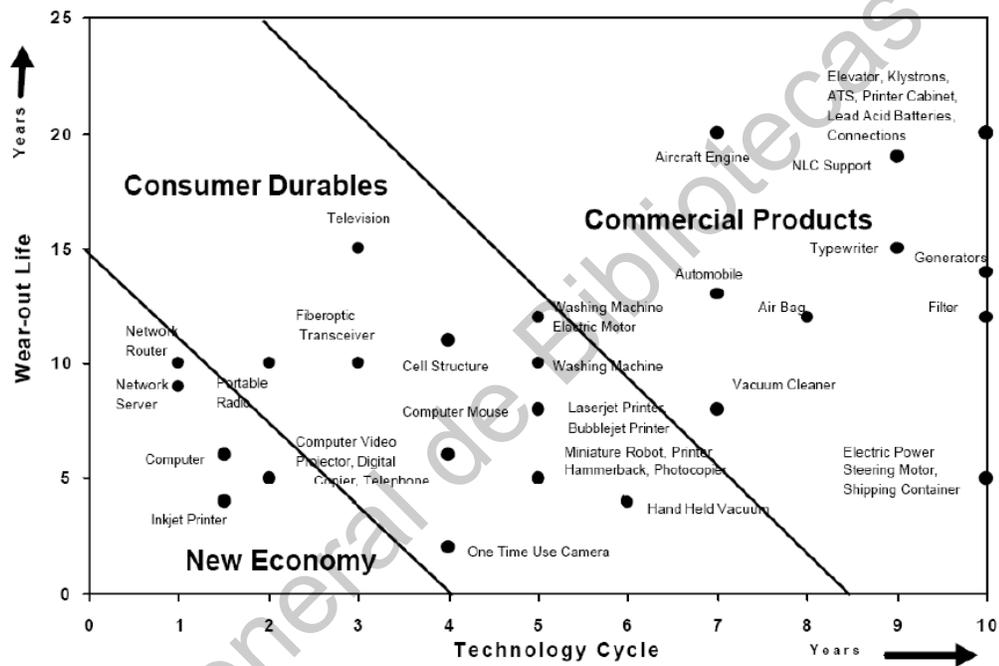


Fig. 9 Ciclo tecnológico vs Confiabilidad de productos.
Fuente: (Ardente & Mathieux, 2012)

2.2.2 Las pruebas de tiempo de vida de las lavadoras

El único test de tiempo de vida para calcular la confiabilidad a nivel componente encontrado en la literatura fue de frenos de lavadora (Sung, 2017). En este trabajo se analizaron 10 frenos de lavadora en un periodo de 4900 horas de uso. La metodología consideraba tres etapas clave: el análisis de fallas, el test de confiabilidad y el análisis estadístico. En el análisis de fallas usaron un FMEA y FTA para conocer la causa raíz de la falla; en el test de confiabilidad usaron un

estandar ya conocido, la ISO 1940-1; para el análisis estadístico utilizaron la distribución Weibull, la cual fue la que más se ajustó a los tiempos a la falla (TTF).

El motivo de no encontrar trabajos a nivel sistema puede ser porque no existen pruebas estandarizadas. En la introducción se mencionó que los estándares como la EN 60456 (Europa), la ANSI/AHAM HLW-1-2007 (EUA, México, Canadá y Chile), la AS/NZS 2040.1:2005 (Nueva Zelanda) y la JIS C 9606 (Japón) podrían adaptarse a pruebas de confiabilidad. Estas normativas, en especial la europea, se enfocan en el control de las condiciones de operación y materiales utilizados en la prueba. Las condiciones controladas son la temperatura ambiente, la humedad ambiente, la temperatura del agua, la dureza del agua, la presión del agua, la cantidad de agua, el pH del agua y el suministro de voltaje; mientras que los materiales controlados son el tipo de carga y detergentes.

Algunos autores expertos en lavadoras en cuestión de confiabilidad, desempeño y seguridad de las mismas, como se mencionaba en el capítulo anterior, afirman que NCL debe de tomarse unidad de tiempo en las pruebas de confiabilidad. Existen NCL normalizados que se utilizan para estimar el consumo energético anual (Stamminger *et al.*, 2018); por ejemplo, las regulaciones europeas consideran de 166 a 295 ciclos para estimar el consumo energético (Boyano Larriba *et al.*, 2017; Stamminger & Schmitz, 2016). Pero, para fines prácticos de confiabilidad, no hay NCL normalizados; algunas recomendaciones recientes son utilizar un NCL a 5000 equivalente a menos de 20 años de uso (Stamminger *et al.*, 2018; Tecchio *et al.*, 2017) o un NCL dependiendo del uso semanal del cliente (Hennies & Stamminger, 2016).

Además de conocer la unidad de tiempo en las pruebas de tiempo de vida, es importante determinar el número de muestras y el nivel de confianza de las pruebas. El método para estimar la confiabilidad de un producto o modo de falla con un cierto nivel de confianza es mediante las pruebas de demostración de confiabilidad. Estas consisten en realizar una prueba de tiempo de vida en donde

si no se presenta algún modo de falla, se tiene cierta confiabilidad. La ecuación que permite demostrar esto se llama “Sucess Run”.

La ecuación *Sucess Run* tiene sus orígenes en la distribución binomial como se puede ver en el trabajo de Kleyner (2008). La ecuación tiene tres variables que son el nivel de confianza (C), el tamaño muestral (n) y la confiabilidad requerida (R). La ecuación en su forma tradicional se muestra en la Ec.(19) y la sustitución del tamaño muestral en la Ec. (20).

$$R = 1 - C^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ec.(19)}$$

$$n = \frac{\ln(1-C)}{\ln(R)} \quad \text{Ec.(20)}$$

La ec. *Sucess Run* tiene diversas versiones con el fin reducir el número de muestras siempre y cuando se conozca el comportamiento de los modos de falla. Estas versiones utilizan distribuciones estadísticas como la Weibull, Exponencial y Gamma para semejar el comportamiento de las fallas. La versión más conocida y utilizada es el tipo exponencial, esta se describe en la Ec. 21. Donde χ^2 es una distribución chi cuadrada y k el número de fallas (Andre Kleyner, 2008).

$$\ln R = -\frac{\chi^2_{1-C, 2(k+1)}}{2n} \quad \text{Ec. (21)}$$

La distribución Weibull tiene una ecuación similar a la exponencial. En el caso de la distribución Gamma se aplica teoría bayesiana para reducir el número de muestras teniendo factores adicionalmente como la innovación del producto y el número de muestras de una prueba realizada con anterioridad (Carruitero, 2011; A. Kleyner *et al.*, 2004; Andre Kleyner, 2008; Andre Kleyner *et al.*, 1997, 2015; Luko, 2010; Nelson, 1977; Yadav *et al.*, 2006). En el trabajo de Kleyney (Andre Kleyner *et al.*, 2015) se explica de manera práctica como utilizar esta versión.

2.2.3 Las pruebas de tiempo de vida en un caso de la empresa Mabe

La empresa cuenta con siete procedimientos llamados “Engineering Test Procedures” (ETP) para evaluar la confiabilidad en la lavadora y sus componentes; de las cuales sólo uno es a nivel sistema. Dentro de los componentes y subsistemas que se evalúan están el subsistema de lavado, la bomba de drenado, la suspensión, los botones e interruptores. La literatura menciona algunas de estas pruebas, como la del subsistema de lavado o del freno y de clutch, y se mencionan como prueba de vida acelerada (ALT). En la Tabla 1 se puede observar el código del procedimiento de la empresa, su nombre, el subsistema y componente que evalúan.

Tabla 1 Pruebas de confiabilidad de Mabe

Código	Nombre	Subsistema	Componente
111E010	<i>Clutch and Impeller Test Procedure</i>	Hidráulico	Bomba
111C003	<i>Continuous Agitate (CA)</i>	Lavado	N/A
111C012	<i>Heavy Unbalanced Spin Test - VA</i>	Lavado	N/A
111C002	<i>Continuos cycle</i>	N/A	N/A
111C007	<i>Lid Switch/ Lid Slam</i>	Apariencia	Lid Switch
111C011	<i>SUS, HA (Server Unbalanced Spin, Horizontal Axis Washers)</i>	Estructural	Suspensión
111C004	<i>Unbalanced Spin Tests</i>	Hidráulico	N/A

Fuente: Mabe SA de CV

La prueba a nivel sistema se llama “ETP 111C002 Ciclo continuo” y consta de evaluar el uso cotidiano de una lavadora con diferentes circunstancias en la mayoría de sus componentes. Los parámetros principales pueden verse en la Tabla 2. La duración de la prueba es de 4000 ciclos / horas y el número de muestras puede variar de 10 a 30 según los ingenieros de diseño. La prueba no cuenta con procedimientos para realizar los cálculos de confiabilidad, no incluye el nivel de confianza ni la confiabilidad del producto al sobrevivir a la prueba.

Tabla 2 Parámetros para prueba de tiempo de vida.

Parámetro	Especificaciones en la prueba
Potencial electrico	123 V
Temp del agua	Para agua caliente @344 K Para agua fria @: 292 K
Dureza del agua	Tener filtros para tener agua dura o @2.5 mmol/l
Presión del agua	420 +- 100 KPA
Tipo de carga	Carga de algodón
Porción de detergente	Recomendada por el fabricante del detergente
Modo de lavado del equipo de lavado	Ciclo donde la duración sea de aprox. Una hora y sea el mayor uso de todos los componentes.
Temperatura ambiental	296.15 K

Fuente: Mabe SA de CV

3. Hipótesis.

El índice de los reclamos de garantía puede predecirse con un nivel de confianza y tamaño muestral más eficiente que los métodos tradicionales, a través del uso de árbol de modos de falla, modelos de confiabilidad y una adaptación del AMEF.

4. Objetivo general

Desarrollar una metodología para predecir los reclamos de garantía de una lavadora residencial en la etapa de diseño y desarrollo, con un nivel de confianza de al menos 85% y que requiera un tamaño muestral menor que el método tradicional.

4.1 Objetivos específicos.

- Proponer una metodología para predecir los reclamos de garantía de una lavadora residencial utilizando modelos de confiabilidad a nivel sistema.
- Comparar la eficiencia de un modelo de *Machine Learning* con algunos modelos de confiabilidad.
- Comparar el nivel de confianza de la predicción de la metodología propuesta con una metodología tradicional.

5. Metodología.

5.1 Metodología para predecir los reclamos de garantía de lavadoras.

Para llevar a cabo la metodología se siguieron cuatro diferentes etapas. Primero se creó un FTA con datos históricos, para a partir de él, estimar el WCR. Después, se determinaron modelos de confiabilidad para cada modo de falla del producto analizado, a través de la información de las pruebas de tiempo de vida. Luego para estimar el WCR del producto, se actualizó el FTA con los modelos de confiabilidad. Y finalmente, se determinó el nivel de confianza de la predicción.

La Fig. 10 muestra un diagrama de bloques de la metodología. Este diagrama se divide en cuatro secciones que se leen de izquierda a derecha: etapas, proceso general, resultados esperados y entregables. Cada etapa agrupa diferentes pasos del proceso. Cada parte del proceso tiene un resultado esperado y entregables que se describirán en más adelante

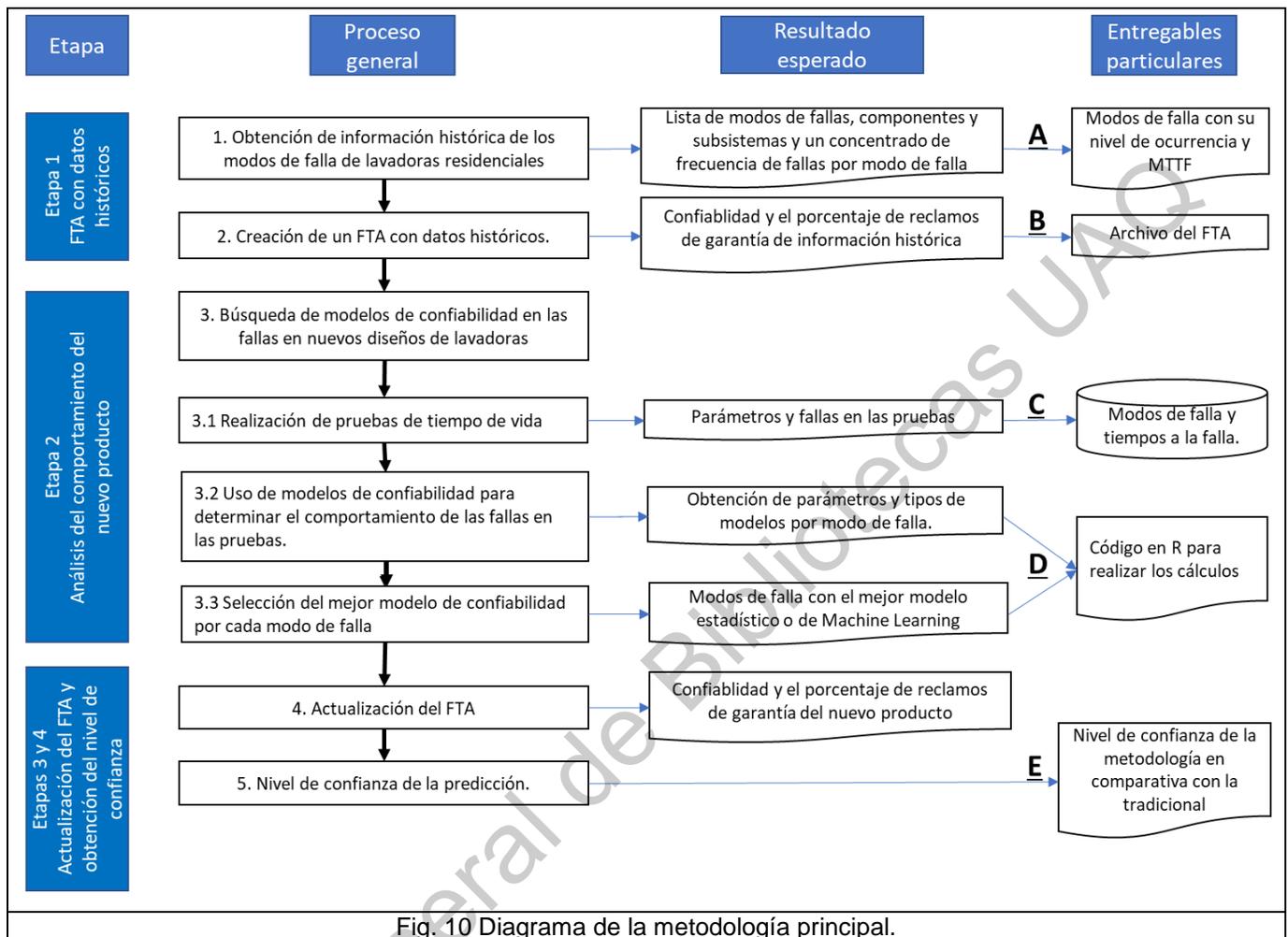


Fig. 10 Diagrama de la metodología principal.

5.1.1 Etapa 1. Creación del FTA con datos históricos

Para la elaboración del FTA, tres tablas fueron creadas con base en datos históricos. La primera tiene información proporcionada por la empresa o laboratorio, en donde hay un registro por cada modo de falla que pueda ocurrir en cada componente. En la Tabla 3 se visualiza un ejemplo de esto; la información que se registra es el modo de falla, el componente y el subsistema pertenecientes componente. Otra de las tablas es una lista de frecuencias por modo de falla obtenida por la empresa a partir de los WCR. Una parte de esta tabla se visualiza en la Tabla 4 donde se registra el modo de falla y su probabilidad de ocurrencia. A partir de las dos tablas anteriores se crea una tercera, cuyo objetivo es determinar

niveles que dependan de la probabilidad de ocurrencia de cada modo de falla. Entre más alto sea el nivel, mayor será su probabilidad de ocurrencia. En la Tabla 5 se visualiza un ejemplo de esto.

Tabla 3 Lista de modos de falla con su componente y subsistema.

Modo de falla	Componente	Subsistema
No funciona en desagüe	Tarjeta electrónica	Electrónico
Sarro en conectores de la tarjeta	Tarjeta electrónica	Electrónico
Conectores macho doblados o dañados	Tarjeta electrónica	Electrónico

Tabla 4 Concentrado de frecuencias de ocurrencia de falla por modo de falla.

Modo de falla	Probabilidad de ocurrencia
No funciona en desagüe	98 / 700,000
Sarro en conectores de la tarjeta	1 / 700,000
Conectores macho doblados o dañados	9 / 700,000

Tabla 5 Lista de modos de falla con su nivel de ocurrencia.

Modo de falla	Nivel de ocurrencia
No funciona en desagüe	3
Sarro en conectores de la tarjeta	1
Conectores macho doblados o dañados	2

Los criterios de evaluación que definen los niveles de ocurrencia se encuentran estandarizados en el AMEF de la *Automotive Industry Action Group* (AIAG). Adicionalmente, una distribución de probabilidad debe ser asignada por cada nivel de ocurrencia con el fin de estimar la confiabilidad. El tipo de distribución escogida para este trabajo es la exponencial, esto se debe a su semejanza con la curva de

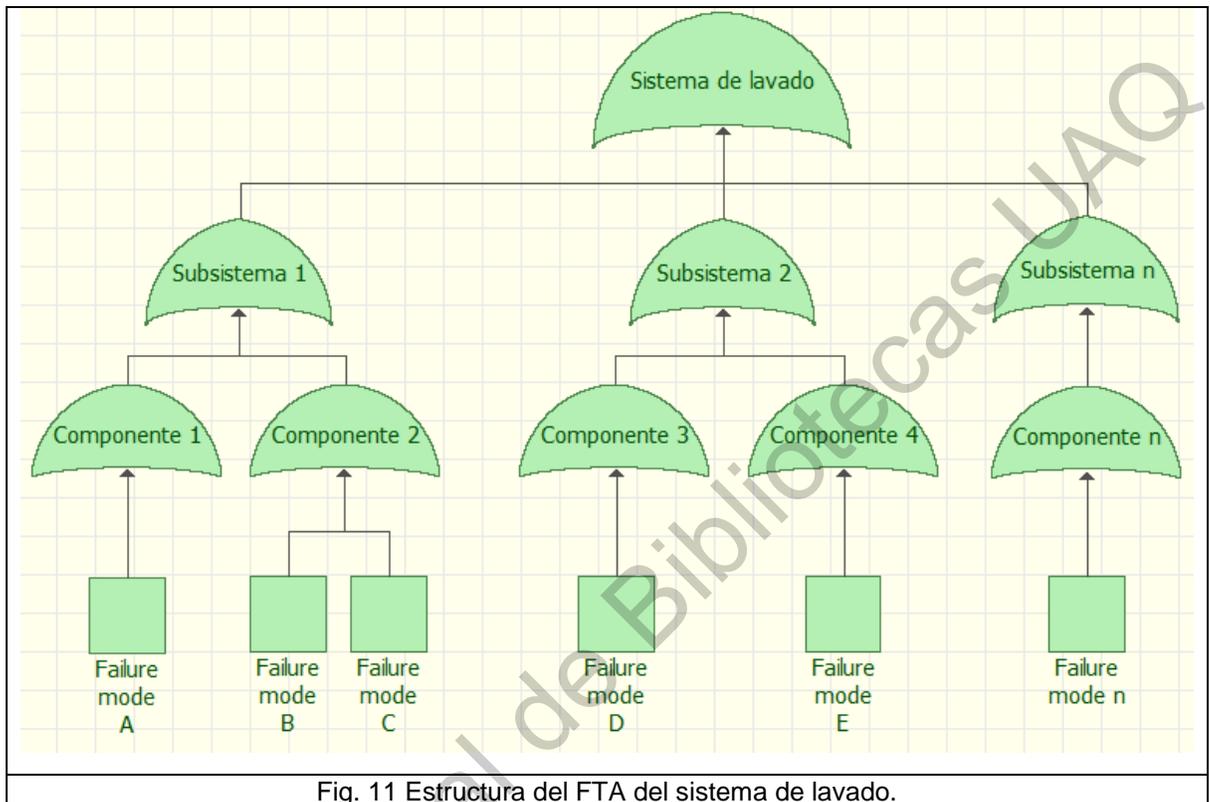
la bañera, por su amplio uso en el análisis de falla de sistemas complejos y a que utiliza un solo parámetro (Andre Kleyner, 2008). Este parámetro se llama “rate” y una de las formas de calcularlo es mediante la inversa del tiempo medio a la falla (MTTF). La cual se obtiene con el producto del tiempo de uso esperado del producto y la inversa de la probabilidad de ocurrencia. La Tabla 6 muestra los niveles de ocurrencia, la probabilidad de falla, el rate y el MTTF con un tiempo de 400 horas de uso. Esto último equivale a un año de uso o al periodo de garantía de una lavadora.

Tabla 6 Adaptación de la tabla de ocurrencias del FMEA para equipos de lavado.

<i>FMEA Occurrancy Rating</i>	<i>Failure Rate (Fail/ # washing machines)</i>	<i>MTTF (1/Failure Rate * 400 hours)</i>	<i>Rate (exponential function) = (1/MTTF)</i>
1	1/1,500,000	600,000,000	0.00000001666
2	1/150,000	60,000,000	0.0000001666
3	1/15,000	6,000,000	0.000001666
4	1/2,000	800,000	0.00000125
5	1/400	160,000	0.00000625
6	1/80	32,000	0.00003125
7	1/20	8,000	0.000125
8	1/8	3,200	0.0003125
9	1/3	1,200	0.0008333
10	1/2	800	0.00125

El FTA, herramienta base de este trabajo, utiliza lógica booleana para calcular la confiabilidad de todo un sistema apoyándose en la estructura de un árbol de decisión (Ruijters & Stoelinga, 2015). Para esta tesis, la raíz principal es el evento de falla de la lavadora. Los nodos son el evento de que un subsistema o componente falle y las hojas son los modos de falla con un respectivo modelo de confiabilidad. Las hojas y nodos se unen mediante compuertas lógicas “OR” de tal modo que, si un componente o subsistema falla, el sistema de lavado fallará en su totalidad. La distribución y organización de este árbol puede verse en la Fig. 11, donde la confiabilidad de la lavadora se estima con el producto de la confiabilidad

de todos los modos de falla entre sí. Por último, el WCR se estima restando a la unidad la confiabilidad del sistema.



5.1.2 Etapa 2. Análisis del comportamiento del nuevo producto.

Con el fin de determinar que modelos de confiabilidad están asociados a cada modo de falla de un nuevo producto o diseño, se usó la información de las pruebas de tiempo de vida realizada al producto. Los parámetros en esta prueba son las especificaciones de control y operación que simulan o replican el uso de la lavadora. Los parámetros se pueden visualizar en la Tabla 7, esta información fue obtenida un manual de procedimientos que pertenecen a la empresa.

Tabla 7 Parámetros para prueba de tiempo de vida.

Parámetro	Especificaciones de la prueba
Voltaje	123 V
Temperatura del agua	Caliente: 344 K Fría: 292 K
Dureza del agua	Agua dura o 2.5 mmol/l
Presión del agua	420 +- 100 KPA
Tipo de carga	Carga de algodón
Cantidad de detergente	Recomendado por proveedor del detergente líquido.
Configuración de la lavadora.	Ciclo extra de lavado para todo tipo de ropa (duración aproximada de 1 hora)
Temperatura ambiental	296.15 K

Fuente: Mabe SA de CV

Para analizar como ocurren las fallas de un producto a través del tiempo en las pruebas, se utilizaron distintos modelos de confiabilidad. Estos, para este trabajo, se clasifican en de dos tipos, los que utilizan distribuciones estadísticas y los que usan algoritmos de ML. En el primer tipo se identifica, de entre varias distribuciones de probabilidad, la que mejor se ajuste al comportamiento de las fallas en un periodo de tiempo determinado. Para seleccionar la distribución, se utilizó el índice *Aikake Information Criterion* (AIC) que en sus cálculos utiliza la verosimilitud y el número de parámetros que describen a cada distribución. Para el segundo tipo, se seleccionó un algoritmo que calcula la confiabilidad; la literatura se recomienda el algoritmo RF con la condición de que el área bajo la curva ROC (AUROC) sea mayor de 0.95.

Posteriormente, para comparar y evaluar los dos tipos de modelos, se estimó la confiabilidad de cada uno. Después, se estimó el error cuadrático medio (MSE) de cada confiabilidad con respecto un valor de referencia. Este valor fue obtenido utilizando un modelo no paramétrico llamado Kaplan-Meier (KM).

Para tener un panorama general, se elaboró un diagrama del proceso de análisis de fallas de productos que son evaluados en pruebas. En la Fig. 12, por un lado se puede ver que se utilizan diferentes distribuciones como la Weibull, Lognormal, Loglogistic, Exponencial y con sus respectivos parámetros para determinar sus error. Por otro lado, se observa el algoritmo *RF* con el método AUROC para evaluar su precisión. Para todos los modelos de confiabilidad, se estima un índice de error de ajuste llamado Mean Square Error (MSE). De los cuales se elige el que tenga menor error, ya sea una distribución o el *Random Forest*. A continuación, se detalla cómo se utilizaron las funciones y librerías de R para lograr lo requerido.

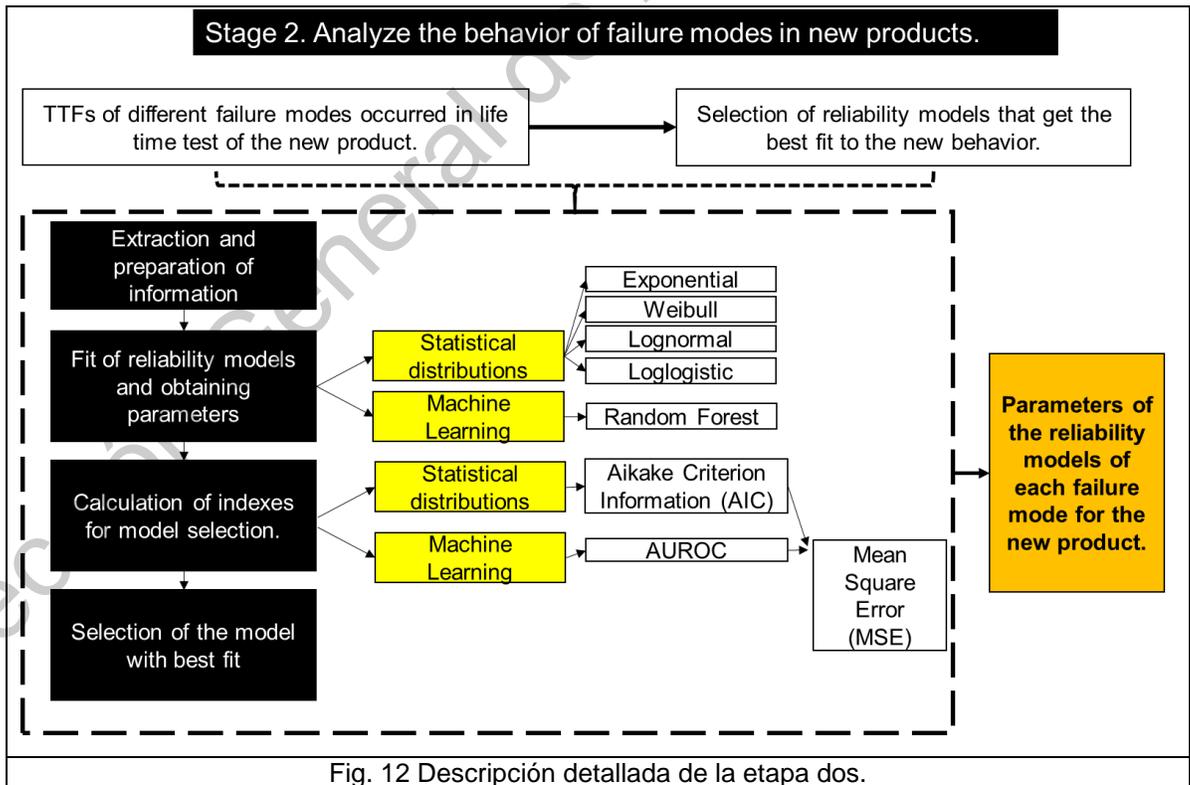


Fig. 12 Descripción detallada de la etapa dos.

Utilizando la librería “survival”, se creó una estructura de datos con el mismo nombre, que es utilizada como entrada para cada uno de los modelos de confiabilidad. Esta estructura contiene cada uno de los tiempos en los que ocurrió una falla. Para ajustar los datos de la estructura a una distribución probabilística, se utilizó la librería “flexsurvreg” que contiene a su vez la función “flexsurvreg”. Esta recibe como entrada los datos con la estructura “survival” y el nombre de distribución, y proporciona de salida los parámetros que la describen con su error de ajuste calculado por el índice AIC. Después, se eligió la distribución de menor AIC, para posteriormente comparar sus resultados con los del *RF*.

Para poder utilizar un modelo de confiabilidad basado en el algoritmo de *RF*, se empleó la librería “ranger” donde la función utilizada coincide con el nombre de la librería. Esta función otorga como salida una estructura de datos *RF* con su respectivo error, que al restarlo de la unidad da como resultado el índice AUROC. Para que el modelo sea considerado válido y preciso, se debe tener un AUROC mínimo de 0.95; esto dependerá de la cantidad de datos disponibles. Del mismo modo, se recomienda que el número de tiempos a la falla registradas sean mayor a 25.

Si el modelo de *Random Forest* es válido, este puede compararse con la distribución que resultó con el AIC mínimo. Para llevar a cabo esto, se determinó la confiabilidad del modo de falla de ambos modelos en diferentes tiempos. Después, se obtuvo la diferencia de cada una de estas con respecto a un valor de referencia. El valor de referencia se estimó utilizando la función “survit” de la librería “survival”. Posteriormente, a las confiabilidades obtenidas de cada modelo se les estimó su MSE respecto a los valores de referencia. Para seleccionar el modelo de confiabilidad que describe mejor el comportamiento de los datos, sea una distribución o el *Random Forest*, se eligió el que tiene el menor MSE.

Las librerías y funciones anteriormente mencionadas se agruparon en una función llamada “confía.uaq”; la cual se desarrolló en R y sirve para analizar la

confiabilidad de un modo de falla con solo tres variables de entrada. Esta función tiene las siguientes consideraciones:

- La función contiene varias instrucciones de diferentes librerías, por lo que es necesario tenerlas instaladas.
- La función sirve para analizar un modo de falla a la vez.
- El código considera que cuando falla el producto/componente/pieza se reponga nuevamente el componente que fallo.
- El código modela la confiabilidad con las funciones probabilísticas de Weibull, exponencial, lognormal y loglogistic. Adicionalmente, modela con el algoritmo de *Random Forest*.
- Los parámetros de entrada son el número de productos a probar en una prueba de tiempo de vida, en este caso lavadoras, el tiempo que duro la prueba y el tiempo en que ocurrieron la o las fallas (TTFs).
- De las lavadoras que no fallaron, se tomará el tiempo de duración de la prueba como censura la derecha.
- Es necesario, para la funcionalidad del algoritmo, que exista al menos un tiempo a la falla (TTF), dos productos a evaluar y el tiempo de duración de la prueba sea mayor al máximo TTF.
- Cualquier TTF debe ser mayor o igual que 1; ya que no sería posible evaluar con la distribución de Weibull.

La salida de la función son los gráficos de las curvas de confiabilidad de los diferentes modelos y una tabla resumen que incluye los parámetros de cada modelo, con sus respectivos índices de error. La Fig. 13 representa el diagrama de proceso de la función. El código en R puede verse en el Anexo 9.4



Fig. 13 Diagrama de proceso de la función

5.1.3 Etapa 3. Actualización del FTA.

En la segunda etapa se obtuvo como resultado un modelo de confiabilidad para cada modo de falla identificado en las pruebas de tiempo de vida. Para cada una de estas fallas se actualizó, en el árbol de la etapa uno, los parámetros que describen el modelo del tiempo en el que ocurre la falla. Una vez realizada esta actualización, se volvió a estimar la confiabilidad y WCR del sistema representada a través del FTA. Adicionalmente, con la final de determinar la falla con menor confiabilidad y que más afecta al sistema de lavado, se realiza un Pareto de los modos de falla.

5.1.4 Etapa 4. Determinación del nivel de confianza de la predicción.

En esta última etapa se determinó el nivel de confianza de la predicción. Para lograr esto, se analizaron distintas ecuaciones que relacionan el nivel de confianza con el tamaño muestral y la confiabilidad requerida por componente. La ecuación que se seleccionó, para uso particular de esta tesis, fue la ec. "Success Run" en su versión exponencial. El motivo de utilizarla se debe a que en la etapa uno se usó la curva de la bañera para modelar las fallas de los datos históricos. La ecuación se describe en la Ec. 22 donde C es el nivel de confianza, n el tamaño muestral, R la confiabilidad requerida por componente, χ^2 la distribución chi cuadrada y k el número de fallas (Andre Kleyner, 2008). Para este trabajo en particular, se empleó la misma ecuación, pero incluyendo λ , el parámetro *rate* de la distribución exponencial y t , el tiempo de duración de la prueba como se ve en la Ec.23

$$\ln R = -\frac{\chi^2_{1-C,2(k+1)}}{2n} \quad \text{Ec. 22}$$

$$\lambda = -\frac{\chi^2_{1-C,2(k+1)}}{2t} \quad \text{Ec. 23}$$

A partir de la media ponderada de los valores de confiabilidad, se estimó la confiabilidad requerida por componente de cada modo de falla de la etapa número

tres. Por último, se realizó un comparativo del nivel de confianza de la manera tradicional con la de esta metodología, es decir, cuando solo se toman en cuenta la información de las pruebas de laboratorio y los datos históricos.

5.2 Consideraciones de nivel sistema

En este apartado se describe las principales consideraciones a nivel sistema para predecir el índice de reclamos de garantía con herramientas de confiabilidad. Se tomaron en cuenta tres consideraciones, estas son el uso del MTTF en lugar del MTBF, la generalización de información del *Service Call Center* y el uso de un AMEF parcial. Estas consideraciones parten del principio de que, al ocurrir cualquier modo de falla en un equipo de lavado, todo el sistema fallará y se presentará un reclamo de garantía.

5.2.1 El uso de MTTF en lugar del MTBF en las pruebas de tiempo de vida.

En la práctica, algunas empresas utilizan el “mean time to failure” (MTTF) y el “mean time between failure” (MTBF) como índices de confiabilidad. Estos índices se calculan de la media del número de tiempos o ciclos de una distribución acumulativa. La diferencia de estos es que el MTTF se usa en productos donde no es opción hacer la reparación del mismo; mientras que el MTBF se usa en productos que tienen la opción de repararse una o varias veces (Jackson, 2016).

Las Ec. 24, 25, 26 y 27 representan el MTTF de las distribuciones Weibull, exponencial, lognormal y loglogistic (Jackson, 2016). Las constantes “shape”, “scale”, “rate”, “meanlog” y “sdlog” se obtienen al ajustar una función paramétrica con la librería flexsurvreg; como caso especial “shape” de la distribución loglogistic debe ser mayor que uno. Entre mayor sea un MTTF, mayor será su confiabilidad, aunque también depende de la forma de la distribución.

$$\text{Weibull MTTF} = \text{scale} * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\text{shape}}\right) \quad \text{Ec. 24}$$

$$\text{Exponential MTTF} = \left(\frac{1}{\text{rate}}\right) \quad \text{Ec. 25}$$

$$\text{Log Normal MTTF} = e^{\text{meanlog} + \left(\frac{1}{2}\text{sdlog}^2\right)} \quad \text{Ec. 26}$$

$$\text{Loglogistic MTTF} = \frac{\frac{\text{scale} * \pi}{\text{shape}}}{\sin\left(\frac{\pi}{\text{shape}}\right)} \quad \text{Ec. 27}$$

En la Fig. 14 se observa la curva de la bañera del ciclo de vida de un producto respecto al tiempo, la tasa de fallos y la diferencia entre MTTF y MTBF. En el MTTF se observa que cuando el producto falla dentro del periodo de garantía, la reparación no es opcional del cliente; por lo que él debe aplicar la garantía para la reposición o reparación de parte del proveedor. En el MTBF, cuando se termina el periodo de garantía, la reparación por parte del cliente es opcional las veces que sea necesaria para que tenga un buen funcionamiento (Jackson, 2016).

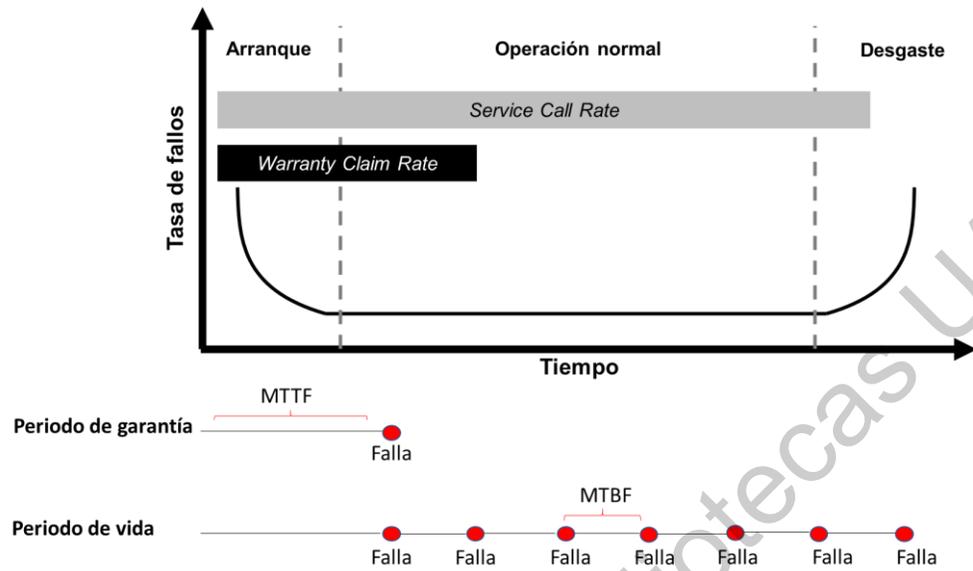


Fig. 14 Curva de la bañera, MTTB y MTBF

En este trabajo, se considera que las empresas deben de predecir los reclamos de garantía usando el MTTF. Esto es porque que el cliente no va a gastar en reparar su equipo si falla en el periodo de garantía. Por lo que, viendo un reclamo de garantía como un evento de falla del producto, este no puede volver a su estado natural, es decir, la empresa no puede recuperar el gasto de la resolución de la garantía una vez ocurrido dicho evento.

En la prueba de tiempo de vida de la empresa se aplica el siguiente proceso: cuando un equipo de lavado falla, se toma nota el tiempo en que fallo la lavadora, se repone el componente en que falló y la prueba sigue en uso, con el fin de ahorrar costo. Sin embargo, en el análisis estadístico usando el MTTF, se considera que la lavadora falló y adicionalmente se anexa una lavadora con una censura por la izquierda con el mismo tiempo de uso que cuando fallo por primera vez. Esto se puede describir en la Fig. 15. Aunado a esto, no se considera una reincidencia de falla del mismo componente, ya que es poco probable que suceda por la alta confiabilidad de la lavadora.

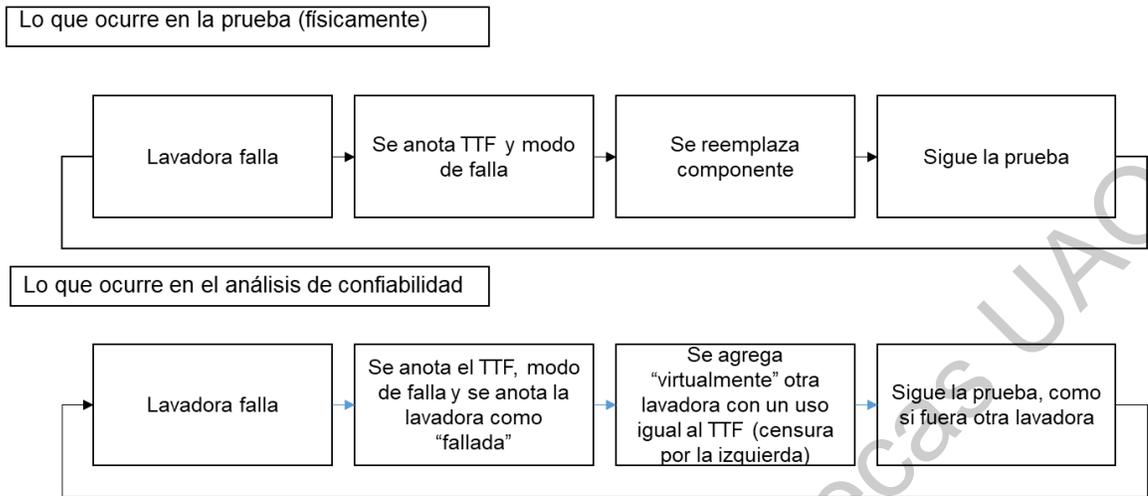


Fig. 15 Uso del MTTF en la prueba de tiempo de vida.

5.2.2 La Información del Service Call Center

En la primera etapa de la metodología se usó información histórica del *Service Call Center* (SCC) para poder determinar los modos de fallas y sus ocurrencias. El SCC Center pertenece a la división de Postventa de Mabe llamada "Serviplus"; la cual ofrece servicio técnico en más de 200 centros de servicio en todo el país de México. La información fue requerida por una consulta en la plataforma de Serviplus; se solicitó un reporte de reclamos de garantía con sus modos de falla en el periodo de enero del 2018 a junio del 2019.

El reporte contenía los modos de fallas ocurridos en periodo de garantía; estas eran 700,000 lavadoras vendidas en México de diferentes modelos. El motivo de no segmentar por tipo de modelo gamma fue por que las lavadoras de la empresa, en su mayoría, son rediseños basados en sus mismos modelos anteriores. Adicionalmente, al segmentar por modelo, se reduce el número de fallas posibles que pueden ocurrir en las lavadoras ya que estas tienen una alta confiabilidad en sus primeros años de uso.

5.2.3 El uso del AMEF

Para poder estandarizar las ocurrencias de las fallas, se utilizó parcialmente la AMEF, es decir, no se utilizaron los apartados de severidad ni detección. Esto lo

han hecho otros autores con el fin de agilizar el proceso de análisis en la industria (Peeters *et al.*, 2018; Yadav *et al.*, 2006) . El motivo de no utilizarlos en este trabajo es porque, al ser reclamos de garantía, la severidad y detección tendrían el mismo nivel y el clasificarlos no tendría utilidad en el FTA. Por lo que, únicamente se evaluó la información del SCC con la tabla de ocurrencia de la AIAG.

La evaluación de ocurrencia de cada modo de falla se realizó con el apoyo de la Tabla 8. En esta evaluación se revisó la ocurrencia de cada modo de falla con el equipo de confiabilidad de la empresa, comprobando que el nivel asignado fuera el correspondiente. Al terminar la evaluación de cada modo de falla se asignó un nivel con el que fue colocado en el FTA dependiendo a que componente y/o subsistema pertenecía.

Tabla 8 Niveles de ocurrencia de la AIAG

<i>FMEA Occurrancy Rating</i>	<i>Failure Rate (Fail/ # washing machines)</i>
1	1/1,500,000
2	1/150,000
3	1/15,000
4	1/2,000
5	1/400
6	1/80
7	1/20
8	1/8
9	1/3
10	1/2

5.3 Particularidades de la metodología

El diagrama general de la metodología, que se presenta en la Fig. 10, contiene algunas relaciones espaciales que se describen en la Tabla 9. La primera columna es una letra que indica la relación, la segunda el bloque principal de la metodología y la última el tema a describir.

Tabla 9 Relaciones particulares de la metodología

Relación	Bloque principal	Tema a describir
A	Modos de falla con su nivel de ocurrencia y MTTF	La elaboración de la lista de modos de falla en una empresa.
B	Archivo del FTA	La creación del FTA con apoyo de un software.
C	Modos de falla y tiempos a la falla.	El desarrollo de unas pantallas de captura de datos.
D	Código en R para realizar los cálculos	El uso de diferentes funciones y librerías en R.
E	Nivel de confianza de la metodología en comparativa con la tradicional	La manera tradicional de estimar los reclamos de garantía y confiabilidad.

5.3.1 Relación A: La elaboración de la lista de modos de falla en una empresa.

La lista de modos de falla, con el fin de aplicar la metodología a un caso real, fue proporcionada por la empresa MABE. Esta fue obtenida por el centro de atención telefónica al cliente llamado "Serviplus". Adicionalmente, se tuvo que homologar los modos de falla que tenía la base de datos del laboratorio de lavadoras con la de Serviplus, para poder trabajar con diferentes áreas de la empresa. El número de lavadoras vendidas, en el periodo del año 2018 y parte del 2019, con el cual se obtuvo la relación de fallas fue de 700,000 lavadoras. En el Anexo 9.1 puede

visualizarse esta lista con el tipo de componente, subsistema, nivel de ocurrencia, MTTF y *rate*.

5.3.2 Relación B: La creación del FTA con apoyo de un software.

La elaboración del FTA se realizó con el apoyo del software “Blocksim V7”. La ventaja de usar el software es que permite realizar de forma ordenada y práctica la estructuración y creación del FTA; además de realizar los cálculos para la estimación de confiabilidad y así generar archivos reeditables del FTA. La Fig. 16 representa un ejemplo del FTA donde se muestra los modos de falla del componente “arnés principal”. Adicionalmente, en el Anexo 9.2 se incluyen dos archivos, el FTA histórico y el FTA del nuevo diseño utilizados en la metodología.

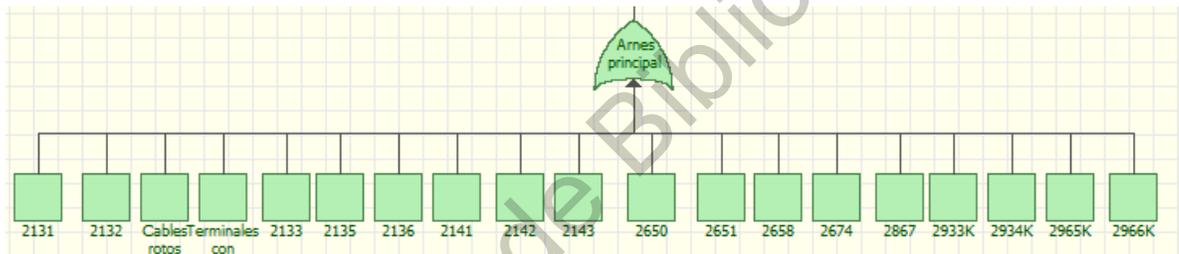


Fig. 16 Ejemplo del FTA en Blocksim

El proceso de elaboración del FTA en Blocksim consta de cuatro pasos. Los primeros tres pueden verse en la Fig. 17; en donde primero se coloca como raíz del árbol el evento de falla de todo el sistema; posteriormente se colocan los subsistemas y componentes de la lavadora como compuertas tipo OR; y luego se agregan los modos de falla como eventos que pertenecen a cada componente. Finalmente, en el último paso, para cada modo de falla, se indica el modelo de confiabilidad. Todo esto puede se puede ver la Fig. 18.

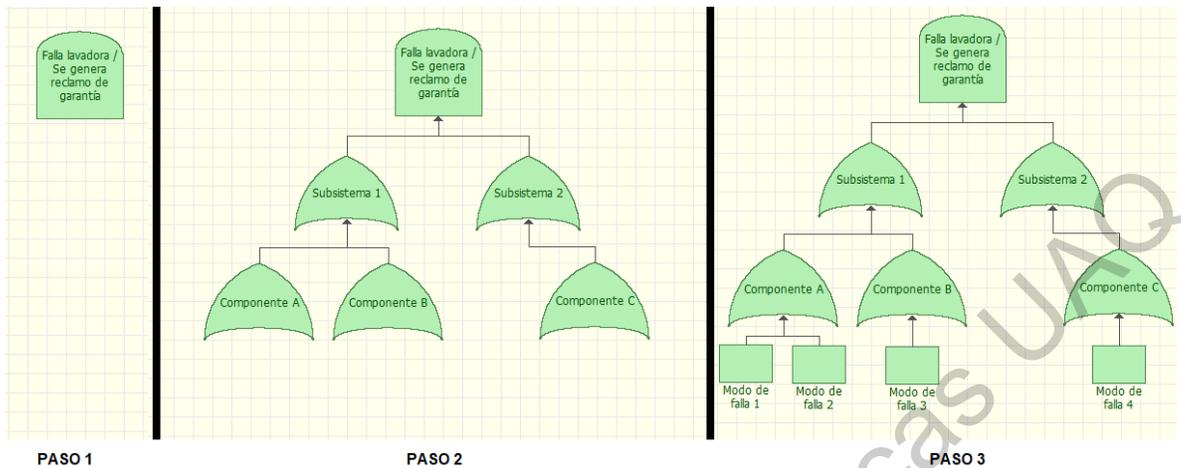


Fig. 17 Tres pasos para la creación del FTA en Blocksim V7

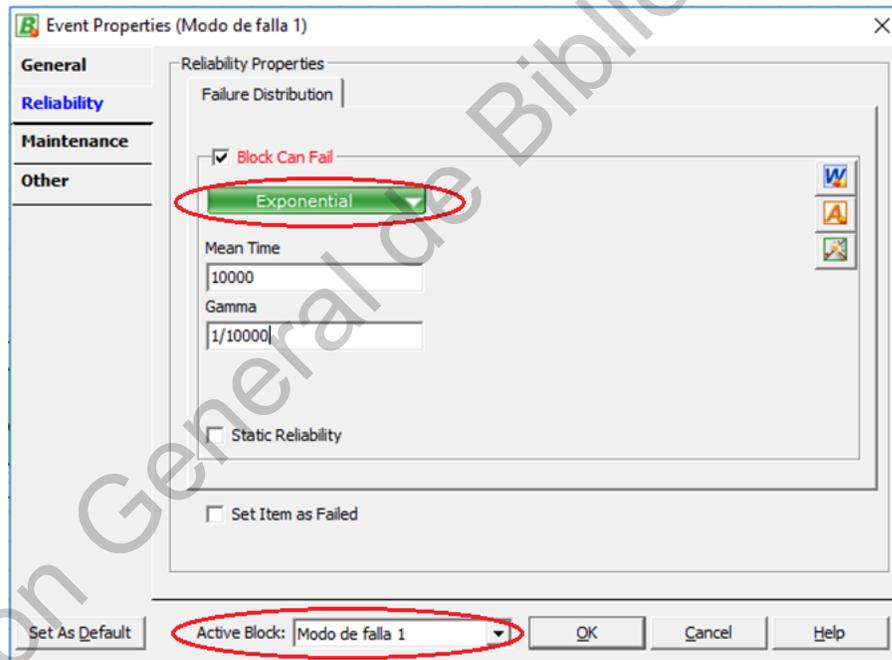


Fig. 18 Último paso para la creación del FTA en Blocksim V7

Adicionalmente, el software realiza los cálculos de estimación de confiabilidad a nivel sistema. La ecuación obtenida por el software para estimar la confiabilidad se puede ver en la Ec. 28, donde $R_{sistema}$ es la confiabilidad de todo el sistema de lavado y las $R_{mf_{allan}}$ representan la confiabilidad los modos de falla. Se observa

que la confiabilidad de cada modo de falla es multiplicada entre si debido a que los componentes y subsistemas son relacionados por compuertas OR.

$$R_{sistema} = R_{mfalla1} * R_{mfalla2} * R_{mfalla3} \quad \text{Ec. 28}$$
$$* R_{mfallan} * \dots$$

5.3.3 Relación C: Desarrollo de pantallas para captura de datos.

Con el objetivo de ordenar la información obtenida de las pruebas de tiempo de vida de la empresa se realizó el diseño de algunas de captura. El desarrollo de estas se llevó a cabo en Rstudio y la estructura de las tablas en donde se almacenó la información se creó en MSQl.

En el anexo 9.3 se muestra un documento donde se explica la manera en que estas deben ser usadas. Este incluye una explicación del funcionamiento de las pantallas, así como instrucciones para su uso, conectividad a la base de datos y algunas indicaciones de fallas. Además, se describe la base de datos de manera general, así como su diagrama relacional.

5.3.4 Relación D: El uso de diferentes funciones y librerías en R.

Los cálculos que se realizaron para estimar los modelos de confiabilidad de los modos de fallas fueron realizados en Rstudio. Este IDE usa el lenguaje R y sus librerías, las cuales, en su mayoría, están publicadas en revistas indizadas y su uso y descarga es gratuito. En la metodología se explicó el proceso para obtener y seleccionar un modelo de confiabilidad a través de una función desarrollada en R; pero en esta subsección se muestra el código y librerías las utilizadas. El anexo 9.4 contiene el código y un ejemplo de uno de los modos de falla de este trabajo.

5.3.5 Relación E. La manera tradicional de estimar los reclamos de garantía y confiabilidad.

En la metodología se comparó la forma de estimar la confiabilidad de una lavadora de este trabajo con la tradicional, pero no se detalló de que trata está ultima. La forma tradicional puede constar de dos puntos de vista dependiendo como se vea

la lavadora, es decir a nivel componente y a nivel sistema. El primero consta de analizar las fallas que ocurrieron en la prueba de vida como si solo fueran un modo de falla. El ultimo consta de realizar un análisis con el FTA considerando cada modo de falla diferente, pero con solo las fallas ocurridas en la prueba de tiempo de vida. La desventaja principal de estas metodologías tradicionales es que la información obtenida de las pruebas de tiempo de vida es relativamente muy poca, lo cual genera un bajo nivel de confianza.

Con los datos obtenidos en la prueba de tiempo de vida y considerando la manera tradicional a nivel componente, 7 modos de falla fueron tomados como si fueran del mismo tipo; esto se analizó y modeló con varias distribuciones de probabilidad. La mejor distribución que se ajustaba al comportamiento de la falla fue la de Weibull; esta tiene un parámetro de forma de $5.090251e-01$ y un parámetro de escala de 88493.878205. Los resultados de confiabilidad y WCR son de 93.79731% y 6.20269% respectivamente; en la Fig. 19 se puede ver la curva de confiabilidad obtenida del número de ciclos respecto al tiempo.

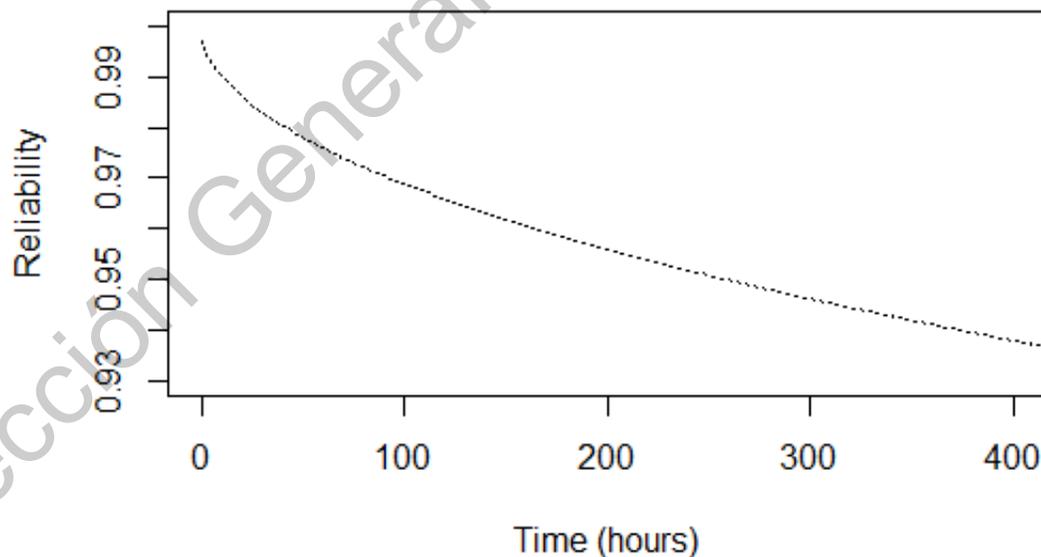


Fig. 19 Confiabilidad con la metodología tradicional (nivel componente)

Utilizando los mismos datos de la prueba se hizo el análisis a nivel sistema. Por lo que se creó un FTA con tres nodos unidos por compuertas OR como se puede ver en la Fig. 20. Cada nodo representa el mejor modelo de confiabilidad para cada modo de falla, el cual puede verse más a detalle en los resultados de esta tesis. Los resultados de confiabilidad y WCR para este modo tradicional son de 95.78% y 4.22% respectivamente. La Fig. 21 muestra el comportamiento de la confiabilidad de la lavadora considerando únicamente los datos de la prueba de tiempo de vida.

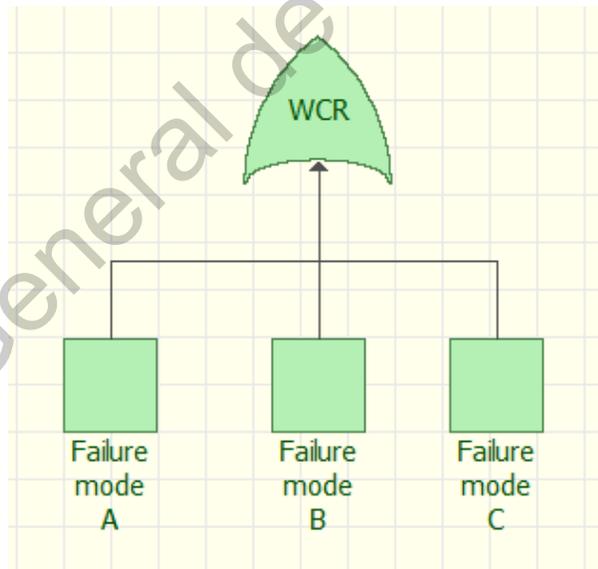


Fig. 20 Árbol de fallas de la metodología tradicional (nivel sistema)



Fig. 21 Confiabilidad con la metodología tradicional (nivel sistema)

Los métodos tradicionales tuvieron entre sí una diferencia de 2% respecto al WCR. Sin embargo, esta información es limitada ya que una lavadora cuenta con más modos de falla y componentes los cuales tienen una confiabilidad alta, los cuales podrían no aparecer en la prueba por la pequeña cantidad muestral. En los resultados de la cuarta etapa de la metodología se incluye en nivel de confianza que se obtiene usando estos métodos, los cuales son muy bajos por el número de muestras donde se obtiene la información.

6. Resultados y discusión

6.1 Resultados

Los resultados obtenidos de cada etapa se muestran a continuación. En la primera etapa, una lista con los modos de falla se elaboró y se puede ver en la Fig. 22. En 49 componentes diferentes de la lavadora se registraron 306 modos de falla distintos. El 32% de los modos de fallan eran de componentes tipo electrónico, un 27% de hidráulicos, un 24% de mecánicos, y un 17% de hidráulicos. El arnés principal, la tarjeta electrónica y la canasta fueron los componentes con más modos de falla con 19, 18 y 16 respectivamente.

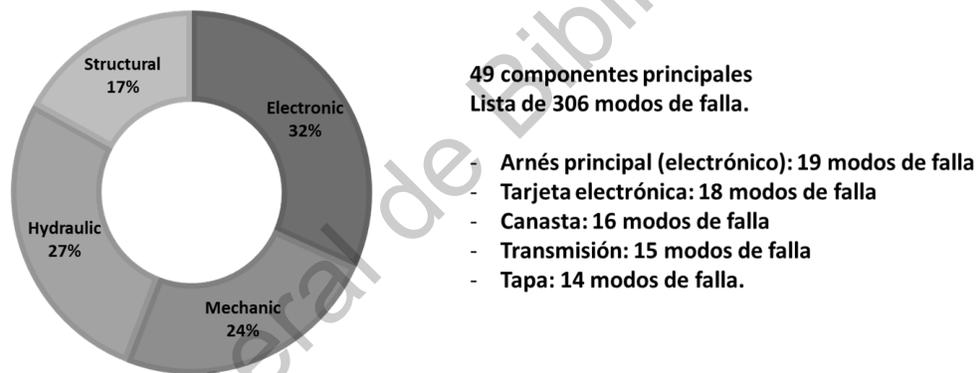


Fig. 22 Resumen de la lista de modos de falla críticos.

De todos los modos de falla, el 57% tienen un nivel de ocurrencia 3; esto quiere decir que la probabilidad de que ocurra una falla dentro del periodo de garantía es de una entre 15,000. La Tabla 10 contiene un resumen de los niveles de ocurrencia dependiendo la cantidad de modos de falla. Los 4 modos de falla con la ocurrencia más elevada fueron el interruptor de la tapa no funciona (electrónico), la tarjeta no ejecuta ciclos de lavado (electrónico), la manguera del está tapada (presostato) y los ensambles generan ruido no normal (transmisión).

Tabla 10 Resumen de los resultados del FMEA parcial.

Niveles de ocurrencia	Núm. de fallas (Total:306)	Ocurrencia	Rate
Nivel 1	32	1/1,500,000	0.00000001666
Nivel 2	86	1/150,000	0.0000001666
Nivel 3	173	1/15,000	0.000001666
Nivel 4	11	1/2,000	0.00000125
Nivel 5	4	1/400	0.00000625

Los resultados del FTA, basados en los datos históricos, están resumidos en la Tabla 11; en ella se muestran los índices de confiabilidad y reclamos de garantía con su respectivo porcentaje. En la Fig. 23 se puede observar el cambio del WCR a través de los ciclos de lavado. En este caso hay un comportamiento lineal; esto se debe a que la distribución exponencial fue escogida para todos los modos de falla. El WCR fue de 2.90, resultado de la aplicación del FTA con la información histórica. Este valor es el esperado por la empresa para el tipo de electrodoméstico que se está analizando.

Tabla 11 Resultados del FTA estandarizado.

Índice	Porcentaje
Confiabilidad promedio	97.10%
Porcentaje de reclamos de garantía promedio	2.90%

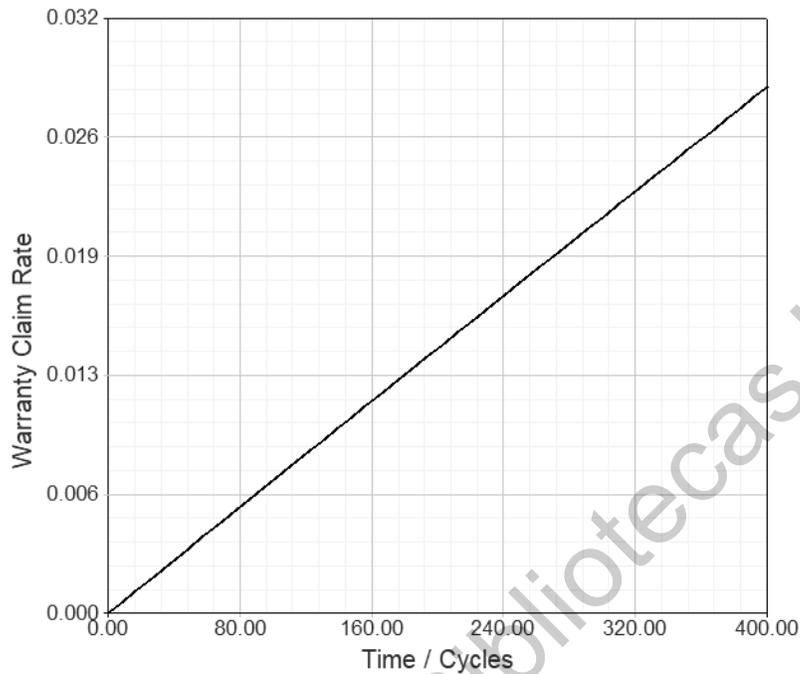


Fig. 23 Predicción del WCR del FTA estandarizado.

En la etapa número dos, se realizó una prueba de tiempo de vida a treinta equipos de lavado residencial. En la prueba, sólo ocurrieron tres modos de falla diferentes. En la Tabla 12 están los datos obtenidos de los modos de falla A, B y C. El modo de falla A está relacionado con un problema en la flecha de transmisión, el modo B a un mal funcionamiento en la tarjeta electrónica y el C a una falla con la tapa del equipo de lavado. La columna de los tiempos a la falla (TTF) contiene el número de ciclos al momento del evento de la falla. En particular, se observó una elevada ocurrencia con el modo de falla A.

Tabla 12 Resumen de los TTFs del nuevo producto.

Grupo de componente	# Modo de falla	TTF
<i>Mechanic</i>	A	800
<i>Mechanic</i>	A	1340
<i>Mechanic</i>	A	2,800
<i>Mechanic</i>	A	2850
<i>Mechanic</i>	A	2,944
<i>Electronic</i>	B	1
<i>Structural</i>	C	372

Para cada modo de falla se evaluó el modelo de confiabilidad que mejor se ajusta a su comportamiento, para los modelos paramétricos de confiabilidad, esto se observa en la Fig. 24; donde las líneas negras representan la disminución de la confiabilidad a través del tiempo. La extrapolación se realizó a 10 años de uso de la lavadora o 4000 ciclos, para ver si hay diferencia entre los modelos.

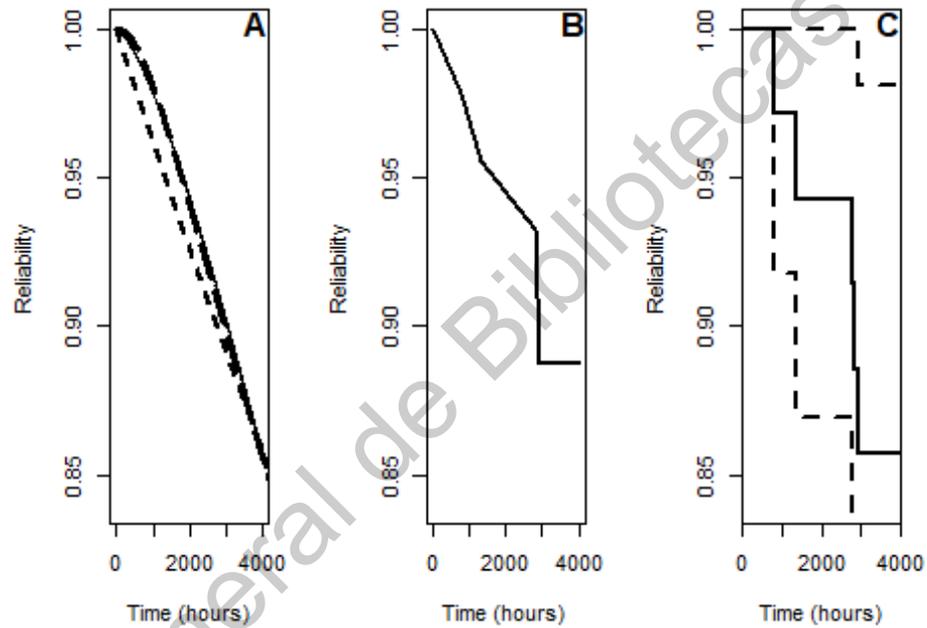


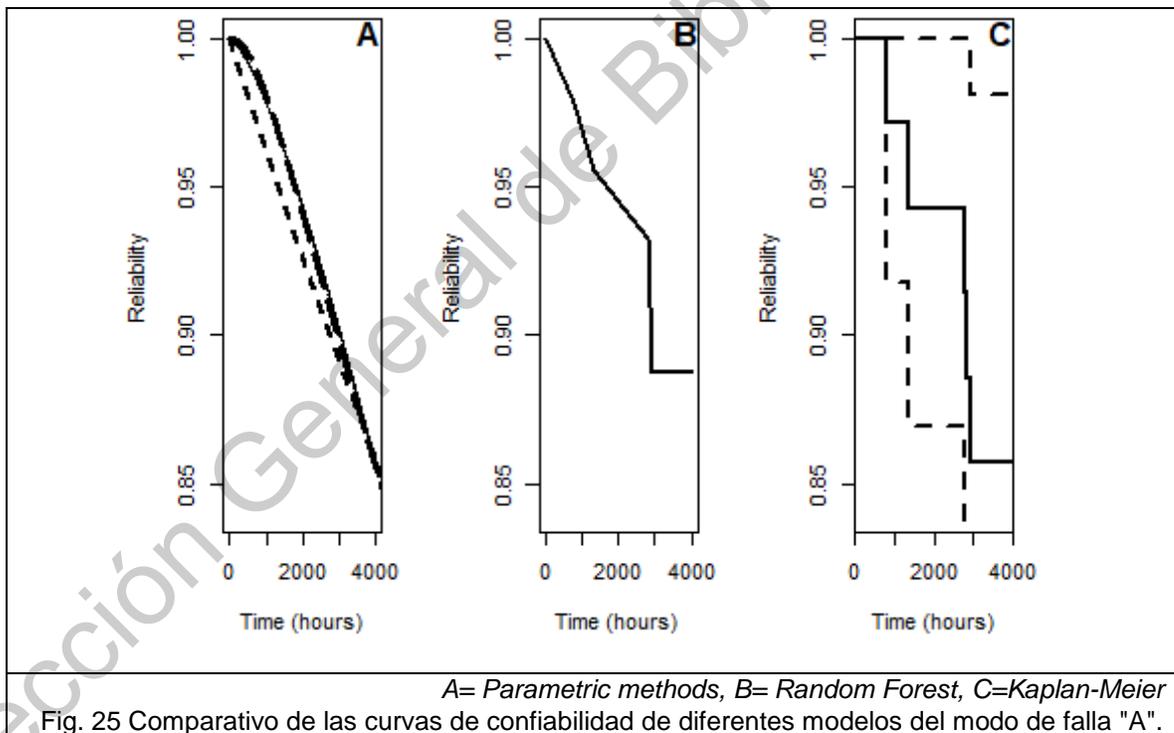
Fig. 24 Curvas de confiabilidad de diferentes modelos del modo de falla A.
 A= Weibull, B= exponencial, C= lognormal y D= loglogistic.

Para el modo de falla A, se utilizaron las funciones Exponencial, Loglisc, Lognormal y Weibull. La Tabla 13 muestra los parámetros de ajuste estimados con las librerías de R. La columna de la izquierda contiene el nombre de la distribución; la del centro el parámetro de forma, *rate* o media y la de la derecha, los parámetros de desviación o escala. Para el caso particular de la función exponencial, se estimó únicamente el parámetro “rate”.

Tabla 13 Parámetros de las funciones paramétricas ajustados a los TTF del modo de falla A

Distribución	Shape/rate/meanlog	Scale/sdlog
Weibull	1.410038024	14984.3592
Exponential	0.0000382456	
Lognormal	9.758569007	1.381939
Loglogistic	1.472348691	13371.2904

En la Fig. 25 se hace una comparación de la confiabilidad del modo de falla A estimada por las distribuciones de tipo paramétricas (a), el algoritmo de RF (b) y el método de Kaplan Meier (c). De manera general, se observó que el rango de confiabilidad a las cuatro mil horas está dentro de 0.88 y 0.85. Esto quiere decir que la confiabilidad bajo entre 12% y 15%.



Para el modo de falla A, la distribución exponencial tuvo el menor AIC y MSE, por lo que se escogió como la que tiene un comportamiento similar al modo de falla A. Asimismo, se seleccionó la distribución lognormal para el B y la distribución exponencial el C. En los dos últimos modos de falla, el error del Random Forest

era el de 1, por lo que no se seleccionaron. La Tabla 14 tiene registrados los cálculos de los índices de AIC, AUROC y MSE de cada modo de falla con las distintas distribuciones.

Tabla 14 Índices de error/ajuste para cada modelo de confiabilidad de cada modo de falla.

"A", "B" y "C". Donde * es para la mejor distribución.

<i>Failure mode</i>	<i>Distribution</i>	<i>AIC</i>	<i>AUROC</i>	<i>MSE</i>
A	Weibull	115.1655	NA	0.000696919
	Lognormal	114.7842	NA	0.000622121
	Exponential*	113.7148	NA	0.000350007
	Loglogistic	115.0959	NA	0.000664907
	<i>Random Forest</i>	NA	0.9375	0.000585823
B	Weibull	19.1	NA	0.00041453
	Lognormal*	18.9	NA	0.00043769
	Exponential	27.4	NA	0.00104032
	Loglogistic	19	NA	0.00041143
	<i>Random Forest</i>	NA	0	0.00015368
C	Weibull	28.4	NA	8.29E-05
	Lognormal	28.3	NA	8.75E-05
	Exponential*	27.4	NA	0.00017024
	Loglogisti	28.4	NA	8.25E-05
	<i>Random Forest</i>	NA	0	2.96E-05

En la tercera etapa se actualiza el FTA realizado en la etapa número uno con la información de la etapa dos; esto da como salida un FTA para el producto en desarrollo. Los resultados del FTA, visibles en la Tabla 15, mencionan que la confiabilidad es de 92.14%. Esta disminuyó alrededor del 4% en comparación datos históricos. Esto se debe al comportamiento de las fallas ocurridas en la prueba.

En la Fig. 26 se puede ver la tendencia del WCR respecto a los ciclos de lavado; se observa un primer incremento de casi 2%, que posteriormente, termina en un 6.86%. Esto se puede traducir a que 1 de cada 50 lavadoras fallarán cuando el

cliente instale o inicie el uso de su lavadora; asimismo, de esas 50 lavadoras, 3 o 4 fallarán en el periodo de garantía, algo costoso para el volumen de venta.

Tabla 15 Resultados del FTA actualizado.

Confiabilidad promedio	93.14%
Porcentaje de reclamos de garantía promedio	6.86%

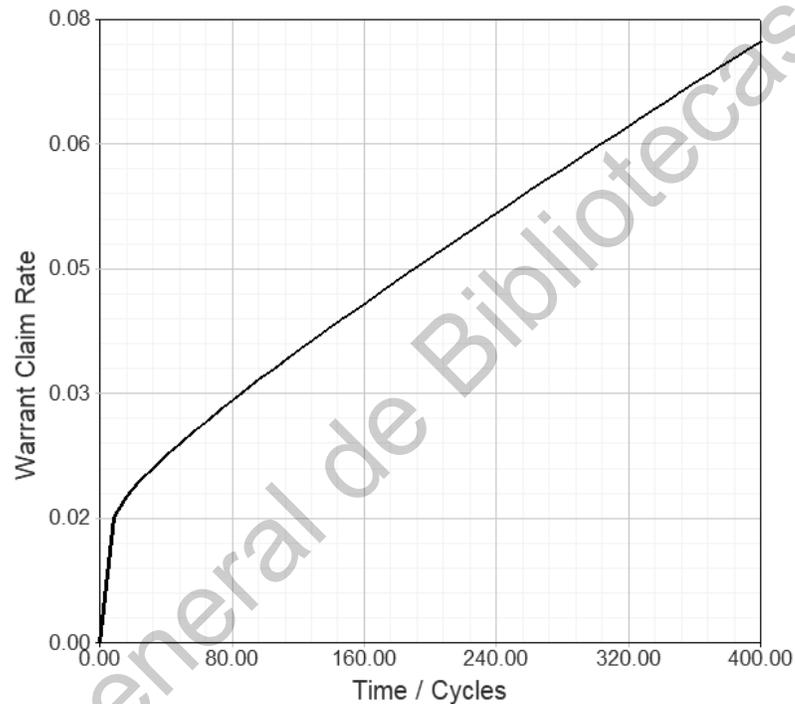


Fig. 26 Predicción del WCR del FTA del nuevo producto.

Los modos de falla que aparecieron en la prueba son los que más afectan la confiabilidad de la lavadora; estos eventos aportan el 55% del WCR. La Fig. 27 es un Pareto que identifica que tanto porcentaje del WCR se disminuye por cada falla dentro del periodo de garantía. Estos datos indican la prioridad para mitigar los modos de falla, B, A y C.

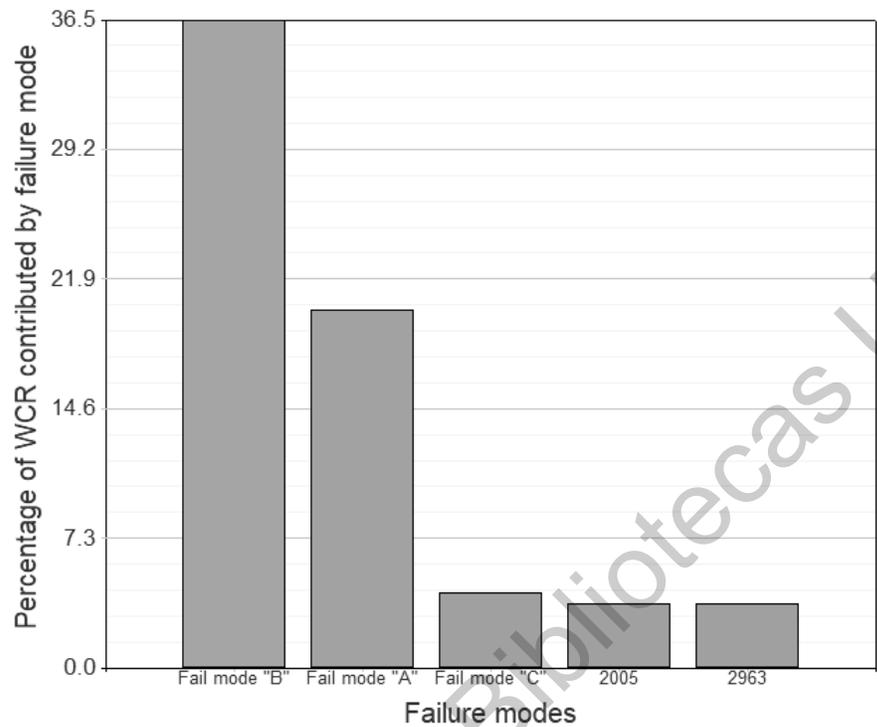


Fig. 27 Porcentaje de aportación de WCR por modo de falla.

En la última etapa se estimó la confiabilidad promedio por componente, con los datos de la primera etapa; esto con el fin de calcular el nivel de confianza de los resultados de la metodología. La Tabla 16 tiene, para cada nivel de ocurrencia, la cantidad de fallas y el MTTF. En la parte media de la tabla, está el promedio ponderado de los MTTF, el parámetro *rate* y la confiabilidad estimada con la distribución exponencial.

Tabla 16 Obtención de la confiabilidad promedio por componente.

Nivel de ocurrencia	Cantidad de fallas históricas	MTTF
1	32	600,000,000
2	86	60,000,000
3	173	6,000,000
4	11	800,000
5	4	160,000
Promedio ponderado de los MTTF		83,030,849.67
Rate (inversa del MTTF)		1.20437E-08
Confiabilidad estimada a las 400 horas (mediante la dist. exponencial)		99.99952%

La metodología tradicional solo utiliza los datos de la prueba de tiempo de vida, pero se observa que no tiene un buen nivel de confianza ya que requiere una cantidad muestral muy grande. Por otro lado, la metodología propuesta obtuvo una precisión del 84.86%, que es un estimado muy cercano considerando la cantidad de lavadoras de donde para obtener la información. El nivel de confianza y el tamaño muestral fueron estimados por la Ec. *Succes Run* en su versión de la distribución exponencial. En la Tabla 17 se puede ver la confiabilidad deseada, el tamaño muestral para obtener un nivel de confianza del 90% y una comparativa de los niveles de confianza de la metodología propuesta y tradicional.

Tabla 17 Niveles de confianza de la predicción realizada.

Confiabilidad requerida por componente	99.99952%
Número de muestras a considerar para demostrar confiabilidad con un nivel de confianza de predicción al 90%	810,357
Nivel de confianza con la información de 700,030 lavadoras (metodología propuesta)	84.86%
Nivel de confianza con la información de 30 lavadoras (metodología tradicional)	0.000001%

6.2 Discusión

El FTA puede integrar los comportamientos de distintos modos de falla para hacer una predicción de la confiabilidad de un producto; esto con el apoyo del AMEF y los modelos de confiabilidad. La estructura o esqueleto del FTA, desarrollado en esta tesis, puede ser reutilizado para rediseños; lo cual genera una reducción en el tiempo de análisis para futuros proyectos. Por ejemplo, una vez que el diseño de un producto se actualiza o mejora y se llevan a cabo sus pruebas de confiabilidad, como ya se tiene el FTA, se puede incluir la información obtenida al FTA; lo que reduce el tiempo de análisis.

El FTA tiene una estructura que se desarrolló en base a los datos del SCC del año 2018 y parte del 2019, por lo que el análisis se enfoca en las fallas principales de estos 2 años. Esto no quiere decir que sean las únicas fallas que puedan aparecer en el producto; existen una gran variedad de componentes y modos de falla que pudieran influenciar el cumplimiento de las especificaciones técnicas del producto. Pero, para la mayoría de los clientes / usuarios, las fallas podrían no tener relevancia, debido a que no las han reportado. El mayor aporte de utilizar la información del SCC es que, aunque se trabaje un número limitado de modos de falla, estas son las más relevantes para el consumidor / cliente final.

La prueba de tiempo de vida, una forma práctica de obtener datos del producto, depende de la cantidad de datos que se pueden obtener. Estos se ven limitados por el número de muestras que el laboratorio pueda proporcionar. Del mismo modo, las pruebas son afectadas por la alta confiabilidad de las lavadoras. A pesar de lo anterior, los datos pueden ser utilizados para su modelado con distribuciones estadísticas. Adicionalmente, en el FTA pueden incluirse los parámetros que describen cada distribución.

Otra de las ventajas del FTA es la posibilidad de estimar la confiabilidad de la lavadora en a través de su tiempo de uso. En este sentido, se estimó el comportamiento a 10 años y se encontró que la confiabilidad en algunos

componentes se reduce de manera más rápida que en otros después del año de garantía. Esto puede ilustrarse en la Fig. 28, donde se observa como disminuye la confiabilidad por cada modo de falla respecto al uso de la lavadora en horas de ciclos de lavado. Se puede diferenciar que el modo de falla A es el segundo lugar en perder confiabilidad en el año de uso, pero a los 10 años tiende a ser el primero. Esto quiere decir que hay modos de falla que pueden no influen al WCR, pero si a la confiabilidad del producto en un periodo largo.

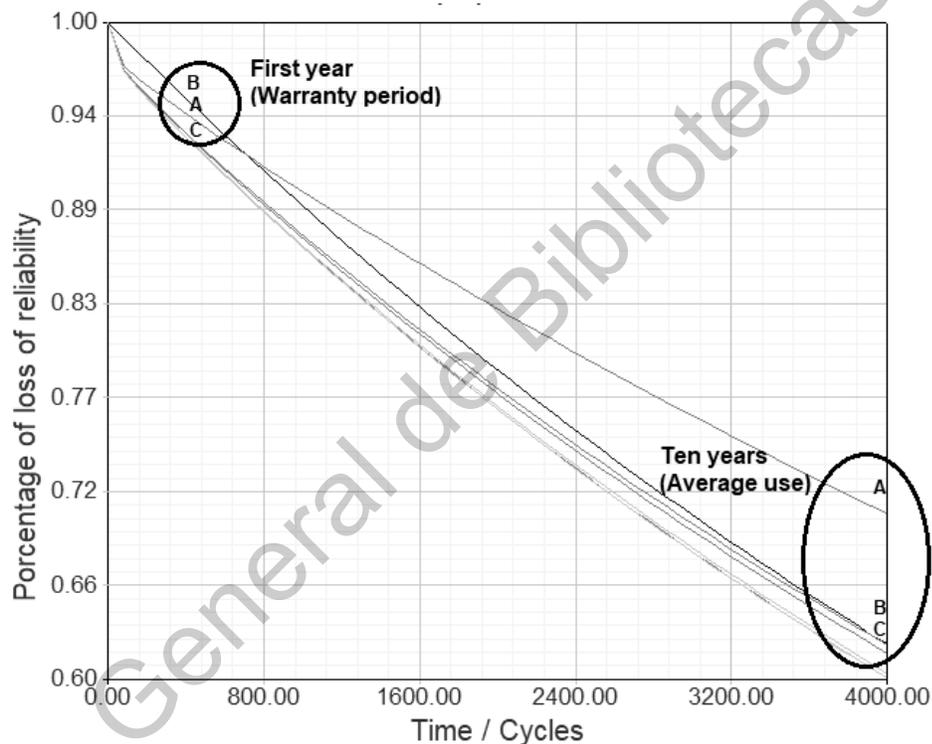


Fig. 28 Porcentaje de disminución de confiabilidad por modo de falla a diez años.

En esta tesis, se logró estimar el nivel de confianza de la predicción de los reclamos de garantía con un casi 85% a nivel sistema. Sin embargo, es un cálculo basado en información histórica con datos de pruebas de laboratorio, por lo que no se consideran las variaciones que pueda haber en el proceso de manufactura, la calidad de los materiales y uso que le da el cliente. No obstante, para aumentar el nivel de confianza se requieren más muestras y pruebas, algo que en la práctica no es tan factible por tiempo y costo.

Conclusiones

La metodología empleada tiene un proceso que organiza la información con herramientas y procedimientos, recomendados por la literatura reciente, para proporcionar información relevante para la toma de decisiones que contribuyen a mejorar la confiabilidad de un producto y la perspectiva del cliente. En esta tesis, se confirma que los modelos de confiabilidad, cuando disponen de pocos datos, las distribuciones clásicas de estadística, en especial la exponencial, dan mejores resultados que los algoritmos de *Machine Learning*. Esto se debe a que los de ML necesitan por lo menos 25 datos (Alsina *et al.*, 2018). Además, el análisis de árbol de falla supuso que los modos de falla del nuevo producto tendrán un comportamiento similar a modelos anteriores. Esto debe de tomarse en cuenta por si futuramente hay algún cambio en componentes, ya que implicaría que pruebas a nivel componente se apliquen para actualizar el modelo. El nivel de confianza estimado fue de casi un 85% con un WCR de 6.86%; el cual indicó la necesidad de hacer una revisión en algunos componentes antes de salir al mercado. Adicionalmente, los resultados obtuvieron una similitud con algunos ya reportados en la literatura de algunos productos a nivel componente. Finalmente, se ve necesario la creación de un estándar o proceso normado internacional para estimar la confiabilidad de equipos de lavado a nivel componente y sistema, que incluya componentes y modos de falla relevantes, aunado a un nivel de confianza.

7. Bibliografía

- Alnujaimi, A., Abido, M. A., & Almuahini, M. (2018). Distribution Power System Reliability Assessment Considering Cold Load Pickup Events. *IEEE Transactions on Power Systems*.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2791807>
- Alsina, E. F., Chica, M., Trawiński, K., & Regattieri, A. (2018). On the use of *Machine Learning* methods to predict component reliability from data-driven industrial case studies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5–8), 2419–2433. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1039-x>
- Althaher, S., Mancarella, P., & Mutale, J. (2015). Automated Demand Response From Home Energy Management System Under Dynamic Pricing and Power and Comfort Constraints. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(4), 1874–1883. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2388357>
- Ardente, F., & Mathieux, F. (2012). Integration of resource efficiency and waste management criteria in European product policies - Second phase - Report 3. *Final Executive Summary*. ..., (November), 121. <https://doi.org/10.2788/72577>
- Bayus, B. L. (1992). Brand Loyalty and Marketing Strategy: An Application to Home Appliances. *Marketing Science*, 11(1), 21–38.
<https://doi.org/10.1287/mksc.11.1.21>
- Boyano Larriba, A., Cordella, M., Espinosa Martinez, M., Villanueva Krzyzaniak, A., Graulich, K., Rüdinauer, I., ... Stamminger, R. (2017). Ecodesign and Energy Label for household washing machines and household washer-dryers. *Joint Research Centre*. <https://doi.org/10.2760/842340>
- Carruitero, P. (2011). *Estacionalidad de la demanda de turismo en Argentina*.
- Chandran, C. V., Sunderland, K., & Malabika, B. (2018). An analysis of harmonic heating in smart buildings and distribution network implications with increasing non-linear (domestic) load and embedded generation. *Renewable Energy*,

126, 524–536. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.081>

da Silva, R. F., & de Carvalho, M. A. (2019). Anticipatory Failure Determination (AFD) for Product Reliability Analysis: A Comparison Between AFD and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for Identifying Potential Failure Modes. In *Advances in Systematic Creativity* (pp. 181–200). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78075-7_12

Dong, L. (2009). Intelligent Evaluation and Intelligent Home Appliances. In *2009 International Conference on New Trends in Information and Service Science* (pp. 932–936). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NISS.2009.168>

Ghosh, C. (2017). A Study on -Evaluating Marketing Strategies Adopted by Home Appliance for Economic Development in India, *1*(1), 9–15. <https://doi.org/10.21744/ijssh.v1i1.7>

Goodarzi, A., Amiri, A., & Asadzadeh, S. (2017). Monitoring the censored lognormal reliability data in a three-stage process using AFT model. *Journal of Industrial Engineering International*, *13*(1), 67–80. <https://doi.org/10.1007/s40092-016-0168-4>

Gurov, S. V., & Utkin, L. V. (2017). Reliability of repairable reserved systems with failure aftereffect. *Automation and Remote Control*, *78*(1), 113–124. <https://doi.org/10.1134/S000511791701009X>

Hamza, Z., & Hacene, S. (2019). Reliability and safety analysis using fault tree and Bayesian networks. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, *11*(1), 73. <https://doi.org/10.1504/IJCAET.2019.096720>

Hariri-Ardebili, M. A., & Pourkamali-Anaraki, F. (2018). Simplified reliability analysis of multi hazard risk in gravity dams via *Machine Learning* techniques. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *18*(2), 592–610. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.09.003>

Hartshorn, S. (2016). *Machine Learning With Random Forests And Decision Trees:*

A Visual Guide For Beginners. (S. Hartshorn, Ed.) (Kindle Edi). Michigan, USA: Amazon Digital Services LLC.

- He, S., Zhang, Z., Jiang, W., & Bian, D. (2018). Predicting field reliability based on two-dimensional warranty data with learning effects. *Journal of Quality Technology*, 50(2), 198–206. <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1436831>
- Hennies, L., & Stamminger, R. (2016). An empirical survey on the obsolescence of appliances in German households. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.04.013>
- Hong, Y., Zhang, M., & Meeker, W. Q. (2018a). Big data and reliability applications: The complexity dimension. *Journal of Quality Technology*, 50(2), 135–149. <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1438007>
- Hong, Y., Zhang, M., & Meeker, W. Q. (2018b). Big Data and Reliability Applications: The Complexity Dimension. <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1438007>
- Hu, Z., & Du, X. (2019). An exploratory study for predicting component reliability with new load conditions. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14(1), 76–84. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0522-x>
- Huang, X., Aslett, L. J. M., & Coolen, F. P. A. (2018). Reliability analysis of general phased mission systems with a new survival signature.
- Jackson, C. (2016). **flexsurv**: A Platform for Parametric Survival Modeling in R. *Journal of Statistical Software*. <https://doi.org/10.18637/jss.v070.i08>
- Johar, R. A., Fakieh, E., Allagani, R., & Qaisar, S. M. (2018). A smart home appliances control system based on digital electronics and GSM network. In *2018 15th Learning and Technology Conference (L&T)* (pp. 52–58). IEEE. <https://doi.org/10.1109/LT.2018.8368485>
- Kabir, S., Yazdi, M., Aizpurua, J. I., & Papadopoulos, Y. (2018). Uncertainty-Aware

Dynamic Reliability Analysis Framework for Complex Systems. *IEEE Access*, 6, 29499–29515. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2843166>

Kang, S., Kim, E., Shim, J., Cho, S., Chang, W., & Kim, J. (2017). Mining the relationship between production and customer service data for failure analysis of industrial products. *Computers & Industrial Engineering*, 106, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.01.028>

Kassner, L., Gröger, C., Mitschang, B., & Westkämper, E. (2015). Product life cycle analytics -next generation data analytics on structured and unstructured data. In *Procedia CIRP* (Vol. 33, pp. 35–40). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.008>

Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2011). Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(8), 925–932. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.03.012>

Khan, W. M., & Zualkernan, I. A. (2018). SensePods : A ZigBee-based Tangible Smart Home Interface, 3063(c). <https://doi.org/10.1109/TCE.2018.2844729>

Kleyner, A., Sandborn, P., & Boyle, J. (2004). Minimization of life cycle costs through optimization of the validation program ~ a test sample size and warranty cost approach. <https://doi.org/10.1109/rams.2004.1285505>

Kleyner, Andre. (2008). Reliability Demonstration in Product Validation Testing. In *Handbook of Performability Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-131-2_34

Kleyner, Andre, Bhagath, S., Gasparini, M., Robinson, J., & Bender, M. (1997). Bayesian techniques to reduce the sample size in automotive electronics attribute testing. *Microelectronics Reliability*. [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(96\)00253-3](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(96)00253-3)

Kleyner, Andre, Elmore, D., & Boukai, B. (2015). A Bayesian approach to

determine test sample size requirements for reliability demonstration retesting after product design change. *Quality Engineering*.

<https://doi.org/10.1080/08982112.2014.990035>

Ku, J.-H. (2017). A Study on Prediction Model of Equipment Failure Through Analysis of Big Data Based on RHadoop. *Wireless Personal Communications*.
<https://doi.org/10.1007/s11277-017-4151-1>

Limon, S., Yadav, O. P., Zuo, M. J., Muscha, J., & Honeyman, R. (2016). Reliability estimation considering usage rate profile and warranty claims. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 230(3), 297–308. <https://doi.org/10.1177/1748006X16631202>

Liu, G., & Peng, C. (2017). Research on Reliability Modeling of CNC System Based on Association Rule Mining. *Procedia Manufacturing*, 11, 1162–1169.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.240>

Luko, S. N. (2010). Attribute Reliability and the Success Run: A Review. In *SAE Technical Paper Series*. <https://doi.org/10.4271/972753>

Modarres, M, Kaminskiy, M., & Krivtsov, V. (2016). *Reliability engineering and risk analysis: a practical guide*. CRC Press.

Modarres, Mohammad, Kaminskiy, M., & Krivtsov, V. (1999). *Reliability engineering and risk analysis: a practical guide*. Technometrics.

Moudoub, A., DeLaux, D., & Hami, A. El. (2018). A new methodology to design a reliable product based on warranty financial data. In *2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)* (pp. 1–6). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/RAM.2018.8463064>

Nassar, M. M., & Ashour, S. K. (2014). Analysis of Exponential Distribution Under Adaptive Type-I Progressive Hybrid Censored Competing Risks Data. *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research*, 10(2), 229.

<https://doi.org/10.18187/pjsor.v10i2.705>

- Nelson, W. (1977). Optimum Demonstration Tests with Grouped Inspection Data from an Exponential Distribution. *IEEE Transactions on Reliability*.
<https://doi.org/10.1109/TR.1977.5220123>
- Peeters, J. F. W., Basten, R. J. I., & Tinga, T. (2018). Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner. *Reliability Engineering & System Safety*, 172, 36–44.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.11.024>
- Rocchetta, R., Li, Y. F., & Zio, E. (2015). Risk assessment and risk-cost optimization of distributed power generation systems considering extreme weather conditions. *Reliability Engineering and System Safety*, 136, 47–61.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.11.013>
- Rodriguez-Trejo, J. J., & Femat-Diaz, A. (2018). Identification of significant variables using *Random Forest*, in a process of injection moulding : A case study of yield reduction analysis in changing plastic injection moulds for auto parts products. In *2018 XIV International Engineering Congress (CONIIN)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CONIIN.2018.8489824>
- Ruijters, E., & Stoelinga, M. (2015). Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools. *Computer Science Review*.
<https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2015.03.001>
- Santhosh, T. V., Gopika, V., Ghosh, A. K., & Fernandes, B. G. (2018). An approach for reliability prediction of instrumentation & control cables by artificial neural networks and Weibull theory for probabilistic safety assessment of NPPs. *Reliability Engineering & System Safety*, 170, 31–44.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.10.010>
- Singh, K., Shroff, G., & Agarwal, P. (2015). Predictive reliability mining for early warnings in populations of connected machines. In *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics, DSAA 2015*. <https://doi.org/10.1109/DSAA.2015.7344806>

- Stamminger, R., & Schmitz, A. (2016). Washing machines in Europe - Detailed assessment of consumption and performance. *Tenside, Surfactants, Detergents*, 53(1), 70–86. <https://doi.org/10.3139/113.110412>
- Stamminger, R., Tecchio, P., Ardente, F., Mathieux, F., & Nistrath, P. (2018). Towards a durability test for washing-machines. *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.014>
- Subbarao, M., Babu, C. S., Satyanarayana, S., & Naidu, P. C. B. (2018). Digital Fuzzy Current Mode Controlled Integrated PFC Converter with External Ramp Compensation. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 27(9). <https://doi.org/10.1142/S0218126618501475>
- Sung, B. J. (2017). Derivation of reliability parameters through reliability analysis and life test of clutch & brake for washing machine. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 7(1), 96–101. <https://doi.org/10.1080/22348972.2017.1324274>
- Tecchio, P., Stamminger, R., Ardente, F., Nistrath, P., & Mathieux, F. (2017). Study for the development of an endurance testing method for washing machines. *JRC Technical Reports*. <https://doi.org/10.2760/19188>
- Ünver, B., Gürgen, S., Sahin, B., & Altın, İ. (2019). Crankcase explosion for two-stroke marine diesel engine by using fault tree analysis method in fuzzy environment. *Engineering Failure Analysis*, 97, 288–299. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.007>
- Wang, L., & Shi, Y. (2013). Reliability analysis of a class of exponential distribution under record values. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 239(1), 367–379. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2012.09.004>
- Wang, X., & Xie, W. (2018). Two-dimensional warranty: A literature review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 232(3), 284–307. <https://doi.org/10.1177/1748006X17742776>

- Wang, Y., Lu, X., & Tan, Y. (2018). Impact of product attributes on customer satisfaction: An analysis of online reviews for washing machines. *Electronic Commerce Research and Applications*, 29, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.elerap.2018.03.003>
- Wood, A. P. (2001). Reliability-metric varieties and their relationships. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2001 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity (Cat. No.01CH37179)* (pp. 110–115). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2001.902451>
- Wu, X., Zhu, Z., Fan, S., & Su, X. (2016). Failure and reliability prediction of engine systems using iterated nonlinear filters based state-space least square support vector machine method. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 127(3), 1491–1496. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.11.024>
- Yadav, O. P., Singh, N., & Goel, P. S. (2006). Reliability demonstration test planning: A three dimensional consideration. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.09.001>
- Yang, S., & Cooke, P. (2018). How accurate is your travel time reliability?— Measuring accuracy using bootstrapping and lognormal mixture models. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1080/15472450.2017.1421075>
- Zhao, B., Xie, L., Li, H., Zhang, S., Wang, B., & Li, C. (2019). Reliability Analysis of Aero-Engine Compressor Rotor System Considering Cruise Characteristics. *IEEE Transactions on Reliability*, 1–15.
<https://doi.org/10.1109/TR.2018.2885354>

8. Anexos

8.1 Lista de modos de falla

ID	MODO DE FALLA	Subsistema	Componente	MTTF	Rate
1	Terminales mal conectadas	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
2	Abierto / Quemado	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
3	Cables rotos	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
4	Terminales con sarro	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
5	Tomacorriente abierto / quemado	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
6	Motor desconectado	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
7	Capacitor desconectado	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
8	Term. sueltas en bomba	Electrónico	Arnés principal	60000000	1.667E-08
9	Term. sueltas en controles tablero	Electrónico	Arnés principal	600000000	1.667E-09
10	Term. y cable no hacen contacto	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
11	Arnés gabinete desconectado	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
12	Arnés cubierto desconectado	Electrónico	Arnés principal	600000000	1.667E-09
13	Arnés termoactuador terminales zafadas	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
14	Zafado / sin cinchos	Electrónico	Arnés principal	60000000	1.667E-08
15	Arnés selector desconectado de tarjeta principal	Electrónico	Arnés principal	60000000	1.667E-08
16	Arnés Lid Lock Desconectado	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
17	Arnés Lid Lock Abierto	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
18	Principal Desconectado	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
19	Válvulas Desconectado	Electrónico	Arnés principal	6000000	1.667E-07
20	Botón Encendido/Apagado Zafado/Sumido	Electrónico	Botón de encendido/apagado	6000000	1.667E-07
21	Botón activado/preactivado	Electrónico	Botonera	6000000	1.667E-07
22	Componentes Activados / No Activa	Electrónico	Botonera	6000000	1.667E-07
23	Abrazadera rota	Electrónico	Capacitor	60000000	1.667E-08
24	Abierto	Electrónico	Capacitor	60000000	1.667E-08

25	Interruptor tapa no funciona	Electrónico	Interruptores / Seguro tapa (Lid lock)	160000	6.250E-06
26	Interruptor tapa pegado	Electrónico	Interruptores / Seguro tapa (Lid lock)	6000000	1.667E-07
27	Placa bimetálico dañada (lid lock)	Electrónico	Interruptores / Seguro tapa (Lid lock)	6000000	1.667E-07
28	Interruptor tapa pistillo bloqueado/no se libera	Electrónico	Interruptores / Seguro tapa (Lid lock)	6000000	1.667E-07
29	Números no encienden	Electrónico	Pantalla electrónica (display)	600000000	1.667E-09
30	Dígitos incompletos	Electrónico	Pantalla electrónica (display)	600000000	1.667E-09
31	Indicadores no encienden	Electrónico	Pantalla electrónica (display)	60000000	1.667E-08
32	Carátula rota	Electrónico	Pantalla electrónica (display)	600000000	1.667E-09
33	Alarma no activa	Electrónico	Pantalla electrónica (display)	6000000	1.667E-07
34	Agua y/o sarro acumulado en terminales	Electrónico	Presostato Electrónico	6000000	1.667E-07
35	Presostato mal conectado	Electrónico	Presostato Electrónico	60000000	1.667E-08
36	Abierto	Electrónico	Presostato Electrónico	600000000	1.667E-09
37	Mal calibrado	Electrónico	Presostato Electrónico	6000000	1.667E-07
38	Pegado	Electrónico	Presostato Electrónico	600000000	1.667E-09
39	Mal calibrado	Electrónico	Presostato mecánico	6000000	1.667E-07
40	Abierto	Electrónico	Presostato mecánico	6000000	1.667E-07
41	Fuera de posición	Electrónico	Presostato mecánico	6000000	1.667E-07
42	Mal conectado	Electrónico	Presostato mecánico	6000000	1.667E-07
43	Conectores dañados o doblados	Electrónico	Presostato mecánico	600000000	1.667E-09
44	Desconectado	Electrónico	Presostato mecánico	600000000	1.667E-09
45	Pegado	Electrónico	Presostato mecánico	6000000	1.667E-07
46	Abierto	Electrónico	Selector	6000000	1.667E-07
47	Pegado	Electrónico	Selector	6000000	1.667E-07
48	Desconectado	Electrónico	Selector	6000000	1.667E-07
49	Fuera de posición	Electrónico	Selector	6000000	1.667E-07
50	Mal conectado	Electrónico	Selector	6000000	1.667E-07
51	Selector roto	Electrónico	Selector	6000000	1.667E-07
52	Selector en corto	Electrónico	Selector	6000000	1.667E-07
53	Vástago Roto	Electrónico	Selector	6000000	1.667E-07
54	Tarjeta Zafada	Electrónico	Selector	6000000	1.667E-07

55	Roto	Electrónico	Selector	6000000	1.667E-07
56	Falso contacto	Electrónico	Tarjeta de botones inicio / pausa modo manual (tarjeta T)	600000000	1.667E-09
57	Base dañada	Electrónico	Tarjeta de botones inicio / pausa modo manual (tarjeta T)	60000000	1.667E-08
58	Sarro en conectores	Electrónico	Tarjeta de botones inicio / pausa modo manual (tarjeta T)	60000000	1.667E-08
59	En corto	Electrónico	Tarjeta de botones inicio / pausa modo manual (tarjeta T)	60000000	1.667E-08
60	Tarjeta de motor dañada	Electrónico	Tarjeta de motor	800000	1.250E-06
61	Tarjeta de motor con sarro	Electrónico	Tarjeta de motor	6000000	1.667E-07
62	Tarjeta motor suelta	Electrónico	Tarjeta de motor	6000000	1.667E-07
63	tarjeta motor roza con ventilador	Electrónico	Tarjeta de motor	6000000	1.667E-07
64	Tarjeta motor desconectada	Electrónico	Tarjeta de motor	6000000	1.667E-07
65	Cables de tarjeta motor dañados	Electrónico	Tarjeta de motor	6000000	1.667E-07
66	Quemada	Electrónico	Tarjeta electrónica	800000	1.250E-06
67	Rota	Electrónico	Tarjeta electrónica	6000000	1.667E-07
68	No funciona en lavado	Electrónico	Tarjeta electrónica	160000	6.250E-06
69	No funciona en centrifugado	Electrónico	Tarjeta electrónica	800000	1.250E-06
70	No funciona en desagüe	Electrónico	Tarjeta electrónica	6000000	1.667E-07
71	Sarro en conectores de la tarjeta	Electrónico	Tarjeta electrónica	600000000	1.667E-09
72	Conectores macho doblados o dañados	Electrónico	Tarjeta electrónica	60000000	1.667E-08
73	Tarjeta en corto	Electrónico	Tarjeta electrónica	60000000	1.667E-08
74	Desconectada	Electrónico	Tarjeta electrónica	6000000	1.667E-07
75	TRIAC Dañado (Tina Gira en Lavado)	Electrónico	Tarjeta electrónica	6000000	1.667E-07
76	Mal ensamblada	Electrónico	Tarjeta electrónica	60000000	1.667E-08
77	Tarjeta electrónica corto en relevador de seguridad	Electrónico	Tarjeta electrónica	6000000	1.667E-07
78	Tarjeta Electrónica Presostato No Respeta Niveles	Electrónico	Tarjeta electrónica	6000000	1.667E-07

79	Tarjeta Electrónica Con Presostato Dañado	Electrónico	Tarjeta electrónica	6000000	1.667E-07
80	Tarjeta De Control Botón Inicio/ Pausa Falso Contacto	Electrónico	Tarjeta electrónica	6000000	1.667E-07
81	Tarjeta Electrónica Led No Enciende	Electrónico	Tarjeta electrónica	6000000	1.667E-07
82	Tarjeta sin personalizar Led de autolimpieza no se desactiva (una vez que se corrió el ciclo de autolimpieza)	Electrónico	Tarjeta electrónica	6000000	1.667E-07
83	Leds no encienden	Electrónico	Tarjeta UI	600000000	1.667E-09
84	Arnés desconectado	Electrónico	Tarjeta UI	6000000	1.667E-07
85	Rota	Electrónico	Tarjeta UI	6000000	1.667E-07
86	Quemada	Electrónico	Tarjeta UI	6000000	1.667E-07
87	Zafada	Electrónico	Tarjeta UI	600000000	1.667E-09
88	Botones Falso Contacto	Electrónico	Tarjeta UI	60000000	1.667E-08
89	Rota / Fracturada	Electrónico	Tarjeta UI	6000000	1.667E-07
90	No Funciona	Electrónico	Tarjeta UI	6000000	1.667E-07
91	Dañada	Electrónico	Tarjeta UI	6000000	1.667E-07
92	Termoactuador con falla eléctrica /Abierto	Electrónico	Termoactuador	60000000	1.667E-08
93	Roto	Electrónico	Termoactuador	6000000	1.667E-07
94	Desconectado	Electrónico	Termoactuador	6000000	1.667E-07
95	Soporte Roto	Electrónico	Termoactuador	60000000	1.667E-08
96	Fuera de posición	Electrónico	Termoactuador	6000000	1.667E-07
97	Varillas fuera de posición	Estructural	Amortiguador/Suspensión	6000000	1.667E-07
98	Rótulas rotas	Estructural	Amortiguador/Suspensión	6000000	1.667E-07
99	Rótulas fuera de posición	Estructural	Amortiguador/Suspensión	6000000	1.667E-07
100	Ruido en rotulas	Estructural	Amortiguador/Suspensión	6000000	1.667E-07
101	Resortes varilla vencidos/rotos	Estructural	Amortiguador/Suspensión	800000	1.250E-06
102	Cilindro roto	Estructural	Amortiguador/Suspensión	60000000	1.667E-08
103	Pegada	Estructural	Amortiguador/Suspensión	6000000	1.667E-07
104					

105	Ensamble varilla intercambiada / error de ensamble	Estructural	Amortiguador/Suspensión	60000000	1.667E-08
106	Serigrafía desalineada	Estructural	Copete	60000000	1.667E-08
107	Vista tablero tallada	Estructural	Copete	60000000	1.667E-08
108	Serigrafía desprendida	Estructural	Copete	6000000	1.667E-07
109	Botón de burbuja roto	Estructural	Copete	6000000	1.667E-07
110	Vista tablero golpeada	Estructural	Copete	60000000	1.667E-08
111	Copete quebrado	Estructural	Copete	6000000	1.667E-07
112	Deformado	Estructural	Copete	60000000	1.667E-08
113	Guías Rotas	Estructural	Copete	6000000	1.667E-07
114	Rayado	Estructural	Cubierta superior	60000000	1.667E-08
115	Golpeado	Estructural	Cubierta superior	60000000	1.667E-08
116	Deformada	Estructural	Cubierta superior	6000000	1.667E-07
117	Marco gabinete roto	Estructural	Cubierta superior	60000000	1.667E-08
118	Decolorado	Estructural	Cubierta superior	6000000	1.667E-07
119	Tornillos flojos	Estructural	Cubierta superior	60000000	1.667E-08
120	Entrada de agua rota/floja	Estructural	Cubierta superior	6000000	1.667E-07
121	Suelta	Estructural	Cubierta superior	60000000	1.667E-08
122	Golpeado	Estructural	Gabinete	6000000	1.667E-07
123	Oxidado	Estructural	Gabinete	600000000	1.667E-09
124	Rayado	Estructural	Gabinete	60000000	1.667E-08
125	Mal pintado	Estructural	Gabinete	6000000	1.667E-07
126	Esquinero vencido	Estructural	Gabinete	60000000	1.667E-08
127	Esquineros desprendidos	Estructural	Gabinete	6000000	1.667E-07
128	Nivelador fuera de posición	Estructural	Patas	60000000	1.667E-08
129	Patas rotas	Estructural	Patas	6000000	1.667E-07
130	Patas sin goma	Estructural	Patas	6000000	1.667E-07
131	Barrida	Estructural	Perillas	60000000	1.667E-08
132	Rayada	Estructural	Perillas	600000000	1.667E-09
133	Rota	Estructural	Perillas	60000000	1.667E-08
134	Perilla dura / no es fácil de girar	Estructural	Perillas	6000000	1.667E-07
135	Serigrafía fuera de posición	Estructural	Perillas	6000000	1.667E-07
136	Decoloradas	Estructural	Perillas	600000000	1.667E-09
137	Rayada	Estructural	Tapa	60000000	1.667E-08
138	Vidrio estrellado/roto	Estructural	Tapa	6000000	1.667E-07
139	Golpeada	Estructural	Tapa	60000000	1.667E-08
140	Torcida	Estructural	Tapa	60000000	1.667E-08

141	Manija tapa rota / floja	Estructural	Tapa	60000000	1.667E-08
142	Mal pintada	Estructural	Tapa	60000000	1.667E-08
143	Actuador fracturado	Estructural	Tapa	60000000	1.667E-07
144	Actuador mal ensamblado	Estructural	Tapa	600000000	1.667E-09
145	Rota / fracturada	Estructural	Tapa	60000000	1.667E-08
146	Buje roto	Estructural	Tapa	60000000	1.667E-08
147	Marco roto	Estructural	Tapa	60000000	1.667E-08
148	Zafada	Estructural	Tapa	60000000	1.667E-08
149	Actuador tapa desajustado	Estructural	Tapa	60000000	1.667E-07
150	Obstruida internamente	Hidráulico	Bomba de recirculado	60000000	1.667E-07
151	Ruidosa	Hidráulico	Bomba de recirculado	600000000	1.667E-09
152	Fuga por sello	Hidráulico	Bomba de recirculado	60000000	1.667E-07
153	Impulsor dañado	Hidráulico	Bomba de recirculado	60000000	1.667E-07
154	Pegada	Hidráulico	Bomba de recirculado	60000000	1.667E-07
155	Rota	Hidráulico	Bomba de recirculado	60000000	1.667E-07
156	Desconectada	Hidráulico	Bomba de recirculado	60000000	1.667E-07
157	Térmico abierto	Hidráulico	Bomba de recirculado	60000000	1.667E-07
158	Pegada	Hidráulico	Bomba de lavadoras automáticas	800000	1.250E-06
159	Oxidada	Hidráulico	Bomba de lavadoras automáticas	60000000	1.667E-08
160	Fuga por sello	Hidráulico	Bomba de lavadoras automáticas	60000000	1.667E-07
161	Fuga por carcaza	Hidráulico	Bomba de lavadoras automáticas	60000000	1.667E-07
162	Obstruida internamente	Hidráulico	Bomba de lavadoras automáticas	800000	1.250E-06
163	Impulsor dañado	Hidráulico	Bomba de lavadoras automáticas	800000	1.250E-06
164	Rota	Hidráulico	Bomba de lavadoras automáticas	60000000	1.667E-07
165	Ruidosa	Hidráulico	Bomba de lavadoras automáticas	60000000	1.667E-07
166	Quemada	Hidráulico	Bomba de lavadoras automáticas	60000000	1.667E-07
167	Motor abierto	Hidráulico	Bomba de lavadoras automáticas	60000000	1.667E-07
168	Térmico abierto	Hidráulico	Bomba de lavadoras automáticas	60000000	1.667E-07

169	Filos cortantes y rebaba	Hidráulico	Canasta	60000000	1.667E-08
170	Desbalanceada	Hidráulico	Canasta	6000000	1.667E-07
171	Aro balance dañado	Hidráulico	Canasta	6000000	1.667E-07
172	Aro balance fuga de agua	Hidráulico	Canasta	6000000	1.667E-07
173	Quebrada/rota	Hidráulico	Canasta	60000000	1.667E-08
174	Pelusa en ropa	Hidráulico	Canasta	600000000	1.667E-09
175	Atorada por prenda	Hidráulico	Canasta	6000000	1.667E-07
176	Pegada	Hidráulico	Canasta	6000000	1.667E-07
177	Tuerca cónica floja / pegada	Hidráulico	Canasta	600000000	1.667E-09
178	Cubierta tina roza con aro balance	Hidráulico	Canasta	60000000	1.667E-08
179	Tornillos fondo flojos	Hidráulico	Canasta	60000000	1.667E-08
180	Embrague Roto	Hidráulico	Canasta	6000000	1.667E-07
181	Canasta Oxidada (café/rojizo)	Hidráulico	Canasta	6000000	1.667E-07
182	Canasta manchada (blanco)	Hidráulico	Canasta	6000000	1.667E-07
183	Fondo plástico Roto / Fisurado	Hidráulico	Canasta	6000000	1.667E-07
184	Fondo plástico con Filos Cortantes	Hidráulico	Canasta	6000000	1.667E-07
185	Fuga	Hidráulico	Despachador Cloro/Detergente	6000000	1.667E-07
186	Roto	Hidráulico	Despachador Cloro/Detergente	60000000	1.667E-08
187	Con residuos o sin diluir líquidos	Hidráulico	Despachador Cloro/Detergente	600000000	1.667E-09
188	Fuga Agua	Hidráulico	Despachador detergente	60000000	1.667E-08
189	Con residuos o sin diluir líquidos	Hidráulico	Despachador detergente	60000000	1.667E-08
190	Roto	Hidráulico	Despachador detergente	60000000	1.667E-08
191	Fuga agua	Hidráulico	Despachador suavizante	60000000	1.667E-08
192	Roto	Hidráulico	Despachador suavizante	60000000	1.667E-08
193	Con residuos o sin diluir líquidos	Hidráulico	Despachador suavizante	60000000	1.667E-08
194	Con rebabas	Hidráulico	Fondo de aluminio	6000000	1.667E-07
195	Dañado	Hidráulico	Fondo de aluminio	6000000	1.667E-07

196	Manga de protección de sobrellenada suelta	Hidráulico	Manga de protección	6000000	1.667E-07
197	Rota	Hidráulico	Manguera de descarga	6000000	1.667E-07
198	Fuga por mal ensamble	Hidráulico	Manguera de descarga	6000000	1.667E-07
199	Porosa	Hidráulico	Manguera de descarga	6000000	1.667E-07
200	Suelta	Hidráulico	Manguera de descarga	60000000	1.667E-08
201	Rota	Hidráulico	Manguera de llenado	60000000	1.667E-08
202	Fuga de agua por mal ensamble	Hidráulico	Manguera de recirculado	600000000	1.667E-09
203	Rota	Hidráulico	Manguera de recirculado	6000000	1.667E-07
204	Fuga por Abrazadera	Hidráulico	Manguera Despachador	6000000	1.667E-07
205	Porosa	Hidráulico	Manguera Despachador	6000000	1.667E-07
206	Rota	Hidráulico	Manguera Despachador	6000000	1.667E-07
207	Fuga	Hidráulico	Manguera Entrada de Agua	6000000	1.667E-07
208	Rota	Hidráulico	Manguera presostato	6000000	1.667E-07
209	Porosa	Hidráulico	Manguera presostato	6000000	1.667E-07
210	Suelta	Hidráulico	Manguera presostato	800000	1.250E-06
211	Restringida/tapada	Hidráulico	Manguera presostato	160000	6.250E-06
212	Rota	Hidráulico	Manguera válvula	600000000	1.667E-09
213	Porosa	Hidráulico	Manguera válvula	6000000	1.667E-07
214	Fuga por abrazadera	Hidráulico	Manguera válvula	6000000	1.667E-07
215	Roto	Hidráulico	Tapa Dámper	60000000	1.667E-08
216	no cierra completamente	Hidráulico	Tapa Dámper	6000000	1.667E-07
217	No Funciona	Hidráulico	Tapa Dámper	60000000	1.667E-08
218	Rota	Hidráulico	Tina de lavado	800000	1.250E-06
219	Porosa	Hidráulico	Tina de lavado	6000000	1.667E-07
220	Fuga por retén	Hidráulico	Tina de lavado	60000000	1.667E-08
221	Fuga por trampa de aire	Hidráulico	Tina de lavado	60000000	1.667E-08
222	Trampa de aire obstruida	Hidráulico	Tina de lavado	6000000	1.667E-07
223	Sello Fuga Agua	Hidráulico	Tina de lavado	6000000	1.667E-07
224	Tina cámara presostato obstruida	Hidráulico	Tina de lavado	6000000	1.667E-07
225	Tuerca Izquierda Floja	Hidráulico	Tina de lavado	6000000	1.667E-07
226	Cubierta Tina Rota	Hidráulico	Tina de lavado	6000000	1.667E-07
227	Quemada	Hidráulico	Válvulas de llenado	800000	1.250E-06
228	Rota	Hidráulico	Válvulas de llenado	6000000	1.667E-07

229	Válvula no corta flujo	Hidráulico	Válvulas de llenado	800000	1.250E-06
230	Fuga por cuerpo	Hidráulico	Válvulas de llenado	60000000	1.667E-08
231	Ruidosas	Hidráulico	Válvulas de llenado	6000000	1.667E-07
232	Fuga Entre Regadera / Tapa Fijación Y Cubierta	Hidráulico	Válvulas de llenado	6000000	1.667E-07
233	Roza en fondo	Impulsor	Agitador/Infusor	60000000	1.667E-08
234	ropa atorada por gap irregular	Impulsor	Agitador/Infusor	6000000	1.667E-07
235	Claro excesivo entre agitador/ infusor y canasta	Impulsor	Agitador/Infusor	6000000	1.667E-07
236	Filos cortantes	Impulsor	Agitador/Infusor	6000000	1.667E-07
237	Roto	Impulsor	Agitador/Infusor	60000000	1.667E-08
238	Zafado	Impulsor	Agitador/Infusor	600000000	1.667E-09
239	Tornillo flojo	Impulsor	Agitador/Infusor	6000000	1.667E-07
240	Cople agitador barrido	Impulsor	Agitador/Infusor	6000000	1.667E-07
241	Cople agitador roto	Impulsor	Agitador/Infusor	6000000	1.667E-07
242	Tapón agitador roto	Impulsor	Agitador/Infusor	60000000	1.667E-08
243	Pegado	Impulsor	Agitador/Infusor	60000000	1.667E-08
244	Rebaba excesiva	Impulsor	Agitador/Infusor	60000000	1.667E-08
245	Propela barrida	Impulsor	Agitador/Infusor	60000000	1.667E-08
246	Rota	Impulsor	Banda	6000000	1.667E-07
247	Tensa	Impulsor	Banda	60000000	1.667E-08
248	Floja	Impulsor	Banda	6000000	1.667E-07
249	Desgastada	Impulsor	Banda	6000000	1.667E-07
250	Fuera de posición	Impulsor	Banda	6000000	1.667E-07
251	Brazo cambiador fracturado/roto	Impulsor	Cambiador	6000000	1.667E-07
252	Brazo cambiador desgastado	Impulsor	Cambiador	60000000	1.667E-08
253	Transmisión ruidosa (baleros)	Impulsor	Cambiador	6000000	1.667E-07
254	Flecha Tx rota (no gira)	Impulsor	Cambiador	6000000	1.667E-07
255	Brazo cambiador ruidoso	Impulsor	Cambiador	600000000	1.667E-09
256	Ruidoso	Impulsor	Cambiador	6000000	1.667E-07
257	No Embraga	Impulsor	Cambiador	6000000	1.667E-07
258	No Desembraga	Impulsor	Cambiador	6000000	1.667E-07
259	Brazo cambiador fuera de posición	Impulsor	Cambiador	6000000	1.667E-07
260	Embrague fijo fracturado	Impulsor	Embrague fijo	600000000	1.667E-09
261	Abocardado / Desgastado	Impulsor	Embrague fijo	600000000	1.667E-09

262	Ruidoso	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	160000	6.250E-06
263	Forzado	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	6000000	1.667E-07
264	fuga de agua separar de fuga de aceite	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	6000000	1.667E-07
265	Fuga por retén inferior	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	600000000	1.667E-09
266	Fuga por retén superior	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	6000000	1.667E-07
267	Fuga por empaque	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	60000000	1.667E-08
268	Fuga por reten tapa	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	60000000	1.667E-08
269	Balero dañado	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	6000000	1.667E-07
270	Flecha lavadora automática zafada	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	6000000	1.667E-07
271	Tornillos del soporte balero flojos	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	6000000	1.667E-07
272	Soporte balero dañado/roto	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	60000000	1.667E-08
273	Transmisión no agita	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	6000000	1.667E-07
274	Dañada por entrada de agua	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	60000000	1.667E-08
275	Transmisión sin aceite / grasa	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	60000000	1.667E-08
276	Balero ruidoso	Impulsor	Ensambls soportes transmisión	60000000	1.667E-08
277	No embraga	Impulsor	Flotador	6000000	1.667E-07
278	No desembraga	Impulsor	Flotador	600000000	1.667E-09
279	Flotador roto / Embrague roto	Impulsor	Flotador	6000000	1.667E-07
280	Carrera Obstruida	Impulsor	Flotador	6000000	1.667E-07
281	Roza en embrague fijo	Impulsor	Flotador	6000000	1.667E-07
282	Conector roto	Impulsor	Motor	60000000	1.667E-08
283	Ruidoso	Impulsor	Motor	60000000	1.667E-08
284	Quemado	Impulsor	Motor	60000000	1.667E-08
285	Terminales zafadas (block motor)	Impulsor	Motor	60000000	1.667E-08

286	Forzado por arrastre	Impulsor	Motor	60000000	1.667E-08
287	Motor en corto	Impulsor	Motor	60000000	1.667E-08
288	Protector térmico abierto / se protege	Impulsor	Motor	60000000	1.667E-08
289	Cables dañados	Impulsor	Motor	60000000	1.667E-08
290	Bobina Principal O Auxiliar Abierta	Impulsor	Motor	60000000	1.667E-08
291	Ensamble tornillo soporte motor suelto	Impulsor	Motor	60000000	1.667E-08
292	Rota ventilador	Impulsor	Polea del motor	6000000	1.667E-07
293	roto/fracturada	Impulsor	Polea del motor	6000000	1.667E-07
294	Desalineada	Impulsor	Polea del motor	6000000	1.667E-07
295	Opresor barrido / flojo	Impulsor	Polea del motor	600000000	1.667E-09
296	Magneto (imán) con polos fuera de posición	Impulsor	Polea del motor	600000000	1.667E-09
297	Magneto (imán) rota	Impulsor	Polea del motor	60000000	1.667E-08
298	Tuerca Floja	Impulsor	Polea del motor	6000000	1.667E-07
299	Dientes Barridos	Impulsor	Polea del motor	6000000	1.667E-07
300	Roza Con Sensor De Velocidad	Impulsor	Polea del motor	6000000	1.667E-07
301	Floja	Impulsor	Polea transmisión	6000000	1.667E-07
302	Rota	Impulsor	Polea transmisión	6000000	1.667E-07
303	Desalineada	Impulsor	Polea transmisión	600000000	1.667E-09
304	Tuerca Floja	Impulsor	Polea transmisión	6000000	1.667E-07
305	Dientes Barridos	Impulsor	Polea transmisión	60000000	1.667E-08
306	Mal Ensamblado	Impulsor	Protector banda	6000000	1.667E-07

8.2 Archivos del FTA

Los archivos se pueden descargar de los siguientes enlaces:

FTA histórico https://drive.google.com/open?id=1rdbTAO7I0s58z7yU6DH5vOysUcw5j9Hj
FTA de nuevo diseño https://drive.google.com/open?id=1_3A8w_AZunghHqVmxYVGbTXVjUv-9eN
BlockSim V7 (Versión para poder abrir los FTA) https://drive.google.com/open?id=14ivEXNfFxAS0UPKE0meNrg7uPMmofYQX

Dirección General de Bibliotecas UAQ

8.3 Manual de usuario de las pantallas de captura.

En este manual se establece el procedimiento para registrar los datos de la prueba de confiabilidad ETP111C002, con el fin de almacenar la información en la base de datos de la empresa para, posteriormente, analizarla con un software de confiabilidad y/o de análisis de datos. Además, se describe de manera general la base de datos y la programación de las pantallas de captura.

Para poder utilizar las pantallas de captura se necesita tener instalado R y Rstudio en su versión más actual; estar conectado a la intranet de Mabe TyP y tener un usuario Mabe; tener instalado, de preferencial, Google Chrome o Firefox; y tener la carpeta apptry1.

8.3.1 Proceso general de las pantallas de captura

El registro de la información consta de 5 pasos consecutivos que son crear un proyecto, registrar las muestras, registrar datos de la operación, registrar *Checklist*, registrar auditorias y registrar fallas; estos se observan en la Fig. 29. En los último tres pasos hay condiciones especiales que dependen del estatus de la prueba. Estas condiciones son que no puedes realizar una auditoria si la prueba está activa, y no puedes realizar un *CheckList* si la prueba esta inactiva. Del mismo modo, para registrar una falla, esta deberá haberse notificado en un *Checklist* o Auditoria.

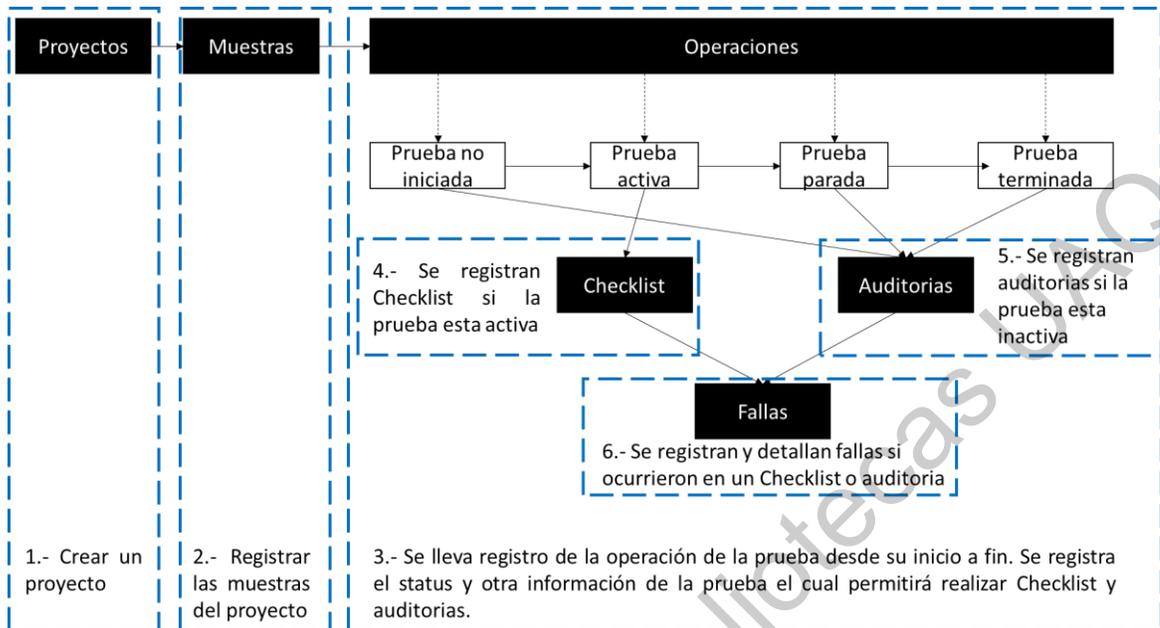
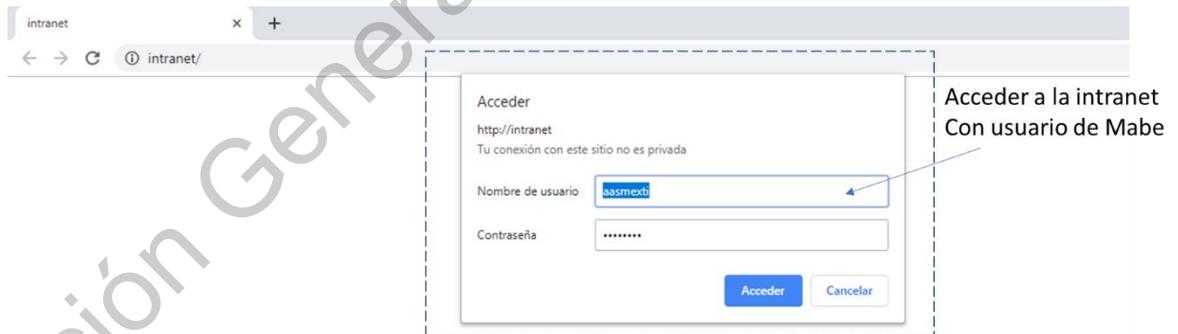


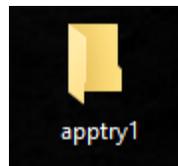
Fig. 29 Proceso de captura de información.

8.3.2 Acceso a las pantallas.

- 1.1 Abrir el navegador web, de preferencia Google Chrome o Firefox e introducir en la barra de direcciones: intranet/
- 1.2 Acceder a la intranet con tu usuario y contraseña de Mabe.



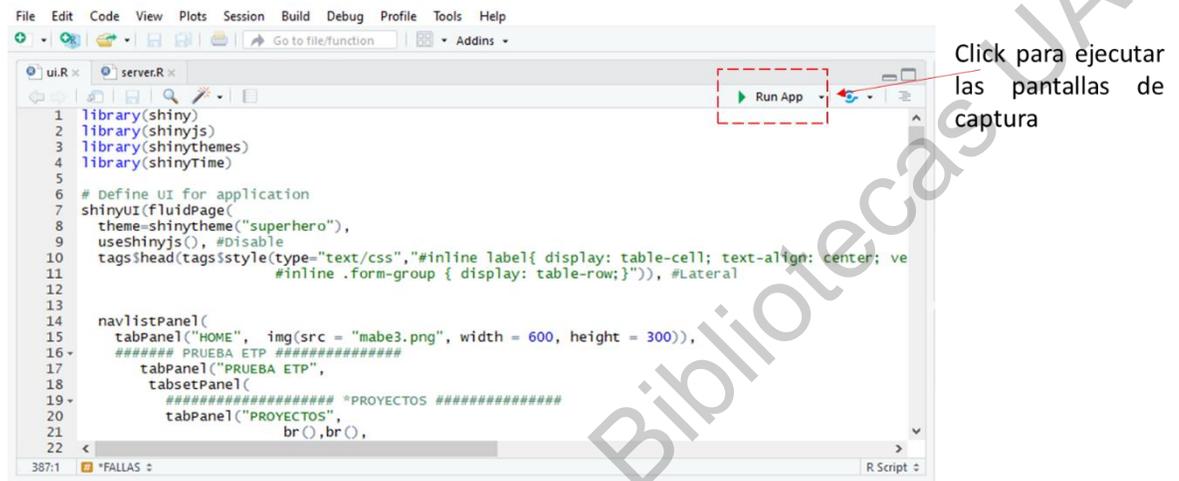
- 1.3 Cerrar el navegador web.
- 1.4 Abrir el directorio apptry1.



- 1.5 Abrir el archivo tipo "R Project" con el nombre apptry1

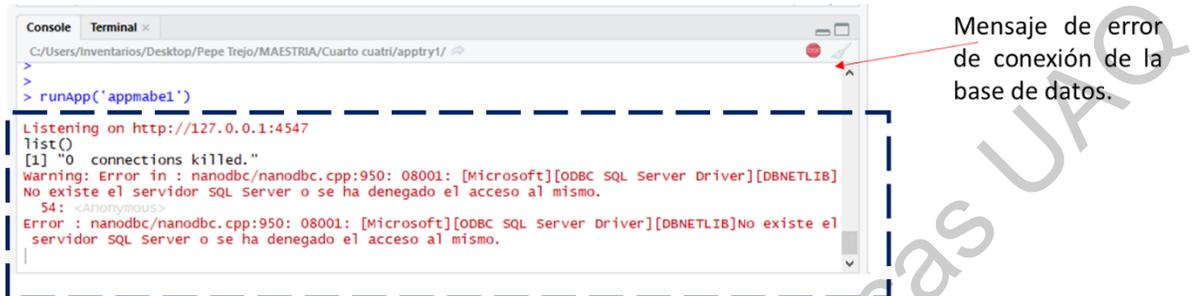
appmabe1	02/11/2018 03:35 ...	Carpeta de archivos	
.Rhistory	03/04/2019 01:30 ...	R Workspace	101 KB
apptry1	19/07/2019 02:59 ...	Archivo RHISTORY	13 KB
apptry1	19/07/2019 02:59 ...	R Project	1 KB

1.6 Al abrir Rstudio, da click en “Run App” para acceder a las pantallas de captura



1.7 Si accediste correctamente entraras al menú Home:

1.8 En caso de que no se ejecuten las pantallas y que salga el siguiente error (ver imagen abajo); verificar que se esté conectado a la red y si se tiene acceso a la intranet. De caso contrario avisar a TI para verificar permisos en la base de datos.



8.3.3 Navegación y captura de datos en las diferentes pantallas.

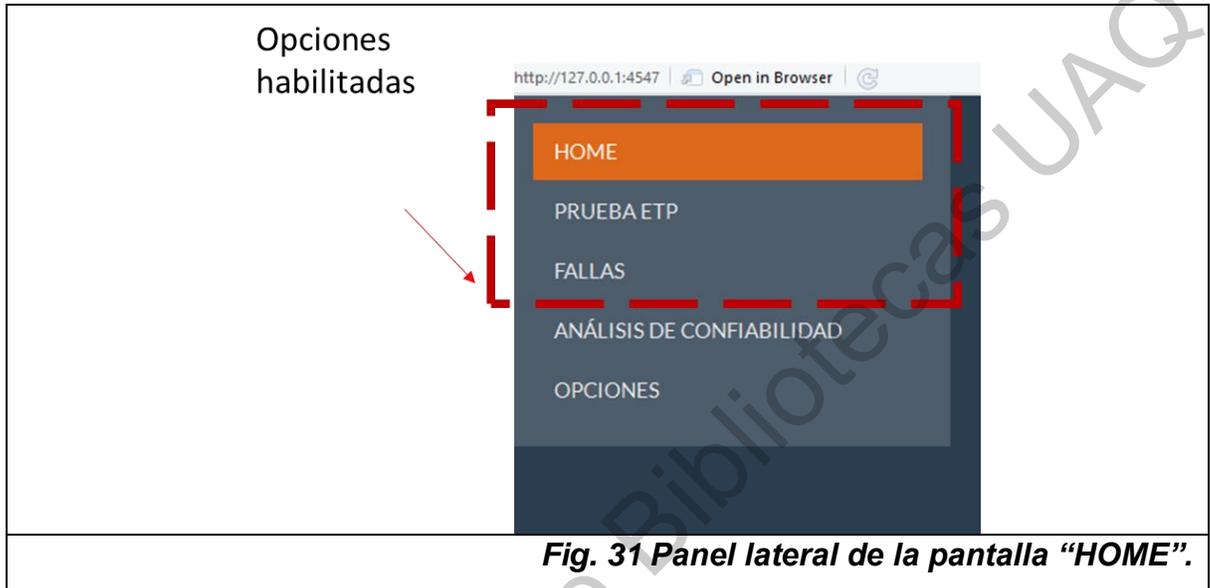
La pantalla inicial

Identificar la pantalla principal de las pantallas de captura, la cual se puede ver en la Fig. 30.



Fig. 30 Pantalla "HOME".

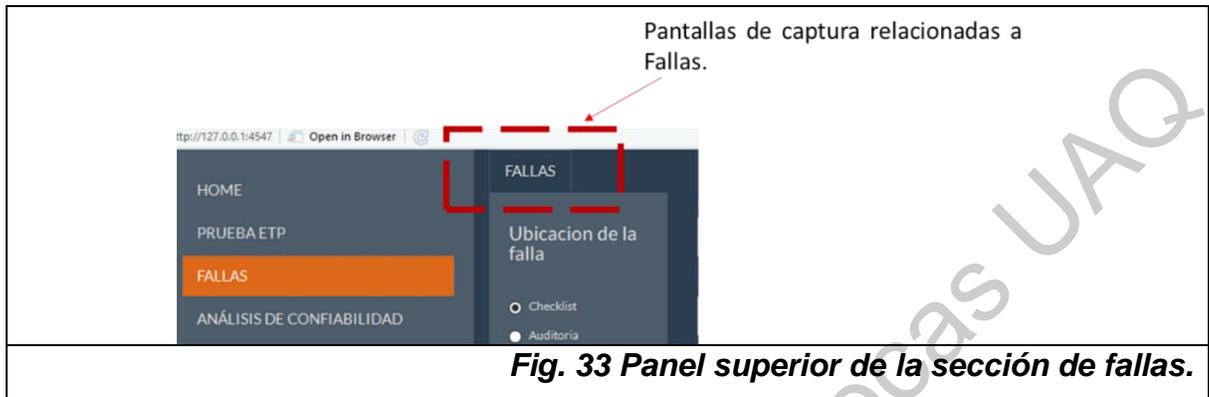
La plataforma tiene 2 secciones funcionales. Estas son las pantallas relacionadas a las capturas de información de la prueba y las relacionadas a la captura de fallas. Dar click en cada una de ellas para navegar entre cada sección como se observa en la Fig. 31.



La sección de pruebas ETP tiene en un panel superior las pantallas de proyecto, muestras, operaciones, *CheckLists* y auditorias, las cuales son observables en la Fig. 32.



La sección de Fallas tiene la pantalla para capturar las mismas como se puede ver en la Fig. 33.



En la pantalla de Proyectos se captura o edita un proyecto o solicitud que será evaluado a través de la ETP. Un proyecto tiene un nombre, un responsable a cargo, una descripción, un objetivo de SCR y la fecha en la que fue creado el proyecto, como se muestra en la Fig. 34.



Muestras.

En la pantalla Muestras se especifican las muestras que pertenecen a cada proyecto. Una muestra tiene identificador, código de inventario, modelo, tipo de producto, mesa donde se va a instalar y subprueba que se le va a realizar. En la pantalla, que se puede apreciar en la parte superior derecha de la Fig. 35, aparece una tabla donde se puede visualizar el contenido total de las muestras.

Request_idReq	idSamp	codInvSamp	modeloSamp	prodIdSamp	EtpInst_idEtpI	WorkStation_MWMS
1	1	74595	GUD27ESSMWW	Centro de lavado	4	1
1	2	74596	GUD27ESSMWW	Centro de lavado	4	1
1	3	74597	GUD27ESSMWW	Centro de lavado	4	1
1	4	74598	GUD27ESSMWW	Centro de lavado	4	1
1	5	74599	GUD27ESSMWW	Centro de lavado	4	1
1	6	74590	GUD27ESSMWW	Centro de lavado	4	1
1	7	74591	GUD27ESSMWW	Centro de lavado	4	1
1	8	74592	GUD27ESSMWW	Centro de lavado	4	1
1	9	74593	GUD27ESSMWW	Centro de lavado	4	1
1	10	74594	GUD27ESSMWW	Centro de lavado	4	1

Fig. 35 Pantalla muestras.

Operaciones.

En la pantalla de Operaciones, observable en la Fig. 36, se lleva a cabo el control de las muestras por su estatus. Dependiendo de este, se pueden realizar acciones para comenzar, pausar, continuar, modificar y terminar la prueba. La acción determina la información a capturar, como la descripción de instalación, tiempo objetivo, tiempo acumulado y fecha y hora del inicio o fin de la prueba.

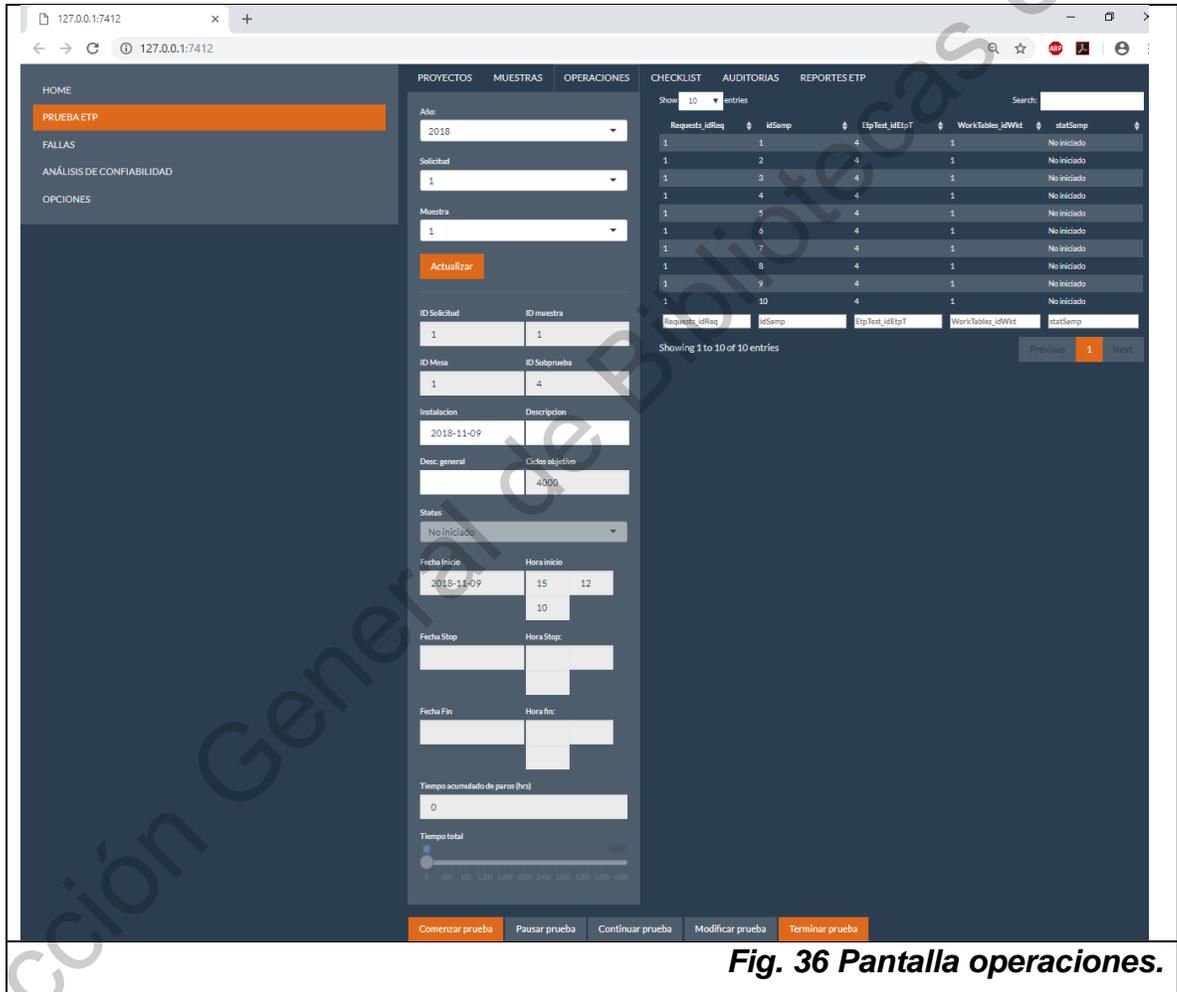


Fig. 36 Pantalla operaciones.

CheckLists.

En la pantalla de CheckLists se registra la información de una revisión rápida realizada a una muestra. Las revisiones solo se registran si el estatus de la muestra es "activo". Los datos que se capturan son fecha y hora, observaciones

en la revisión, tiempos acumulados y la presencia de una falla. La pantalla se puede observar en la Fig. 37

Fig. 37 Pantalla checklist.

Auditorías.

En la pantalla Auditorías se registra la información de las auditorías por cada muestra, esta pantalla se puede ver en la Fig. 38. Los datos a capturar son las magnitudes de los torques de componentes clave, algunas inspecciones visuales, fecha, hora, descripción, encargado, tiempos acumulados y un campo para determinar si hubo falla o no.



Fig. 38 Pantalla auditorias.

Fallas

En la pantalla Fallas se detallan las fallas ocurridas en las verificaciones y auditorías. En estas se registra el tiempo a la falla (TTF), el modo de falla que ocurrió, fecha y hora como se puede observar en la Fig. 39. Para esto es necesario seleccionar que proyecto, muestra, verificación o auditoría, subsistema y componente pertenecen a la falla. Además, se registra si la falla es de tipo FRACAS y si el registro de fallas fue realizado completamente.

127.0.0.1:4658

HOME

PRUEBA ETP

FALLAS

ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD

OPCIONES

FALLAS REPORTES

Ubicación de la falla

o Checklist

● Auditoria

Año

Opción 1

Solicitud

Opción 1

Muestra

Opción 1

Id Checklist/auditoria

1

Id Falla en Checklist/auditoria

Nuevo registro

Fecha de la falla

2018-12-03

Hora de la falla

12 00 00

Tiempo acumulado

TTF (horas)

1

Subsistema

Estructural

Componente

3

Modo de falla

3

ES FRACAS?

Registro completo

Descripción

Crear Modificar Borrar

Fig. 39 Pantalla fallas.

Estructura de la base datos

La base de datos de las capturas de pantalla debe contemplar el proceso de la prueba ETP #111C002, el cual consiste en una serie de pasos que inician a partir de una solicitud. En dicha solicitud se analizan varias muestras que se instalan en una mesa con condiciones controladas. Una vez instaladas las muestras se da inicio a la prueba, donde se realizan evaluaciones a las muestras cada determinando tiempo, por medio *checklists* y auditorias.

Eventualmente en las evaluaciones se presentan uno o varios modos de falla, los cuales deben ser registrados. Cuando termina la prueba, se desinstalan las muestras y se analiza la información. La solicitud que se genera al iniciar la prueba debe tener un identificador de solicitud, nombre de la solicitud, descripción, año de la solicitud, *service call rate* requerido de la solicitud y encargado o responsable de la solicitud.

Una solicitud puede tener una o varias muestras, pero una muestra no puede pertenecer a varias solicitudes. Los datos que debe tener cada muestra son un identificador de la muestra, código de inventario de la muestra, modelo de la muestra, descripción de la muestra, tipo de producto de la muestra, fecha de instalación en mesa de trabajo, descripción o incidencias en la instalación, descripción general de la muestra, estatus de la muestra, fecha inicial de la prueba, fecha de paro de la prueba, fecha de fin de la prueba y tiempo acumulado de paro de la prueba.

A cada muestra se le asigna una prueba ETP que contiene un identificador, nombre, descripción y versión. Además, cada muestra es instalada en una mesa de trabajo, la cual tiene un identificador, descripción, máxima capacidad y su estatus; asimismo, en cada mesa se mide el voltaje, temperatura, dureza, presión del agua y se tiene un identificador de medición. A las muestras instaladas se les realizan auditorías y *checklists*. Las auditorias son evaluaciones a detalle que se llevan a cabo con poca frecuencia debido a su complejidad; estas capturan información sobre torques de tornillos, tensiones de banda y estado de la suspensión.

Los datos capturados en las auditorias son el identificador de auditorías, identificador de muestras de la tabla de muestras, fecha en la que se realiza la auditoría, año de uso, descripción de la auditoría, encargado de la auditoría, torque de tornillo al 11, torque de motor izquierdo y derecho, torque de cambiador izquierdo y derecho, torque de la polea del motor, torque del agitador, tensión de la banda 1 a 4, detalles de la suspensión frontal izquierda, derecha, posterior izquierda y posterior derecha, campo para determinar si ocurrió una falla en la auditoría, campo para determinar si la auditoria esta completa y el tiempo acumulado de la prueba.

Al igual que las auditorías se realizan *checklist*, evaluaciones breves y constantes que tienen un identificador, fecha, descripción, campo para determinar si ocurrió una falla y un campo para determinar si el *checkList* se realizó completamente. En una auditoría y en un *checklist* se pueden presentar una o varias fallas, las cuales son definidas por un identificador del modo de falla, nombre y subnivel de los productos donde se encontró la falla.

Por cada falla encontrada en una auditoría o *checklist* se elabora un registro que detalla la fecha de la falla, sistema donde se presentó, componente donde se presentó, causa raíz, campo para determinar el tipo de falla, descripción de falla y tiempo a la falla. Una vez registrada toda la información se procede a terminar la prueba, desinstalar las muestras y a analizar los datos obtenidos. En la Fig. 39 se muestra el esquema de la base de datos con la información mencionada anteriormente de la estructura de los datos.

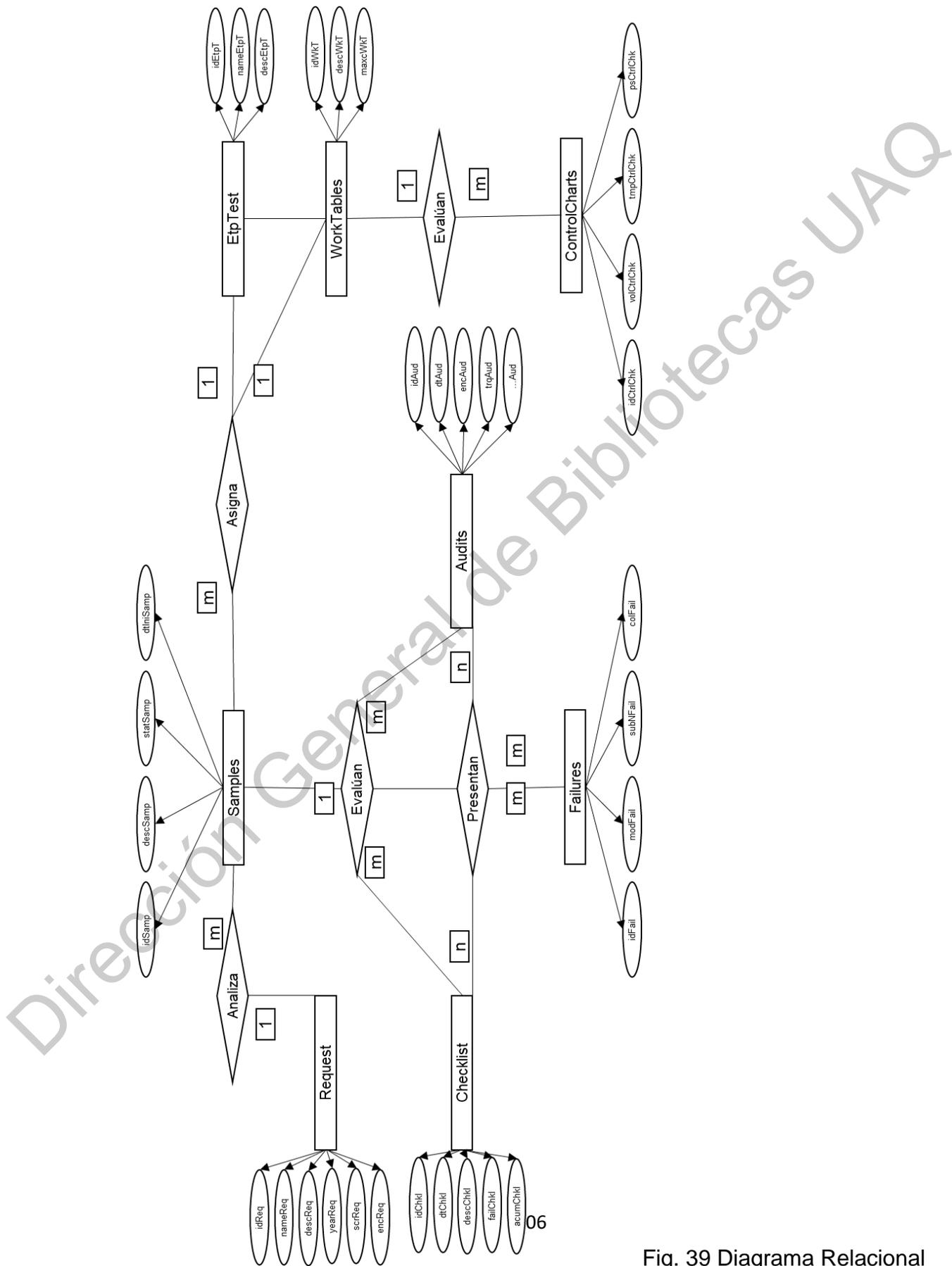


Fig. 39 Diagrama Relacional

8.3.4 Código en R de las pantallas de captura.

Rstudio y su complemento Shiny permiten usar las librerías de R para crear interfaces de usuario y conectarse con bases de datos de MySQL o MSQ. En este trabajo, se usó el esquema básico de trabajo de Shiny que funciona mediante dos grupos de código. El primer grupo de código es la interfaz con el usuario y el segundo es la programación de la misma. En la Fig. 40 se muestra cómo funciona de manera sencilla Rshiny, donde existe una relación continua entre la interfaz gráfica y la programación. A continuación, se describe de manera general como leer los grupos de código en Rstudio.

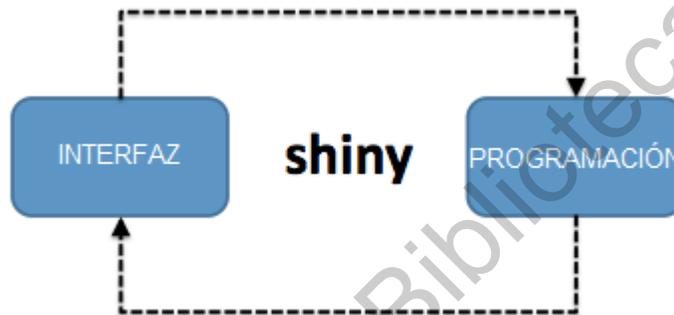


Fig. 40 Funcionamiento general de las pantallas de captura de Shiny.

Grupo de código: interfaz.

Para entender el código de la interfaz, es necesario saber cómo navegar en el script, el diagrama de bloques de la Fig. 41 muestra la estructura de la interfaz. Además, como se muestra en la Fig. 42, en la parte izquierda se señala en color rojo donde se ubica el navegador del *script*. Al darle click se desplegará un menú como en la parte derecha de la figura. En dicho menú se podrá navegar en ciertas partes del código.

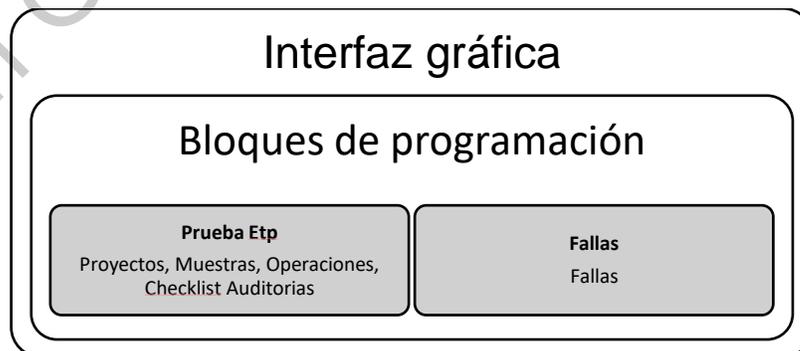


Fig. 41 Diagrama de bloques int. gráfica

```
1 library(shiny)
2 library(shinyjs)
3 library(shinythemes)
4 library(shinyTime)
5
6 # Define UI for application
7 shinyUI(FluidPage(
8   theme=shinytheme("superhero"),
9   useShinyjs(), #Disable
10  tags$head(tags$style(type="text/css", "#inline label{ display: table-cell; text-align: center; vertical-align: middle; width: 100%; }", "#inline .form-group { display: table-row; }")), #Lateral
11
12
13
14
15  navlistPanel(
16    tabPanel("HOME", img(src = "mabe3.png", width = 600, height = 300)),
17    ##### PRUEBA ETP #####
18    tabPanel("PRUEBA ETP",
19      tabsetPanel(
20        ##### *PROYECTOS * #####
21        tabPanel("PROYECTOS",
22          br(), br(),
```

PRUEBA ETP
*PROYECTOS
*MUESTRAS
*OPERACIONES
*CHECKLIST
*AUDITORIAS
FALLAS
*FALLAS

Fig. 42 Navegador del script de la interfaz.

Grupo de código: programación.

Al igual que el grupo de código de interfaz, es necesario saber cómo navegar en el script. La programación en R shiny es extensa, ya que se programa objeto por objeto. Una de las formas de desarrollar el código de forma ordenada es realizar una función por objeto. En la Fig. 43 se visualiza el navegador con todas las funciones de las pantallas de captura. En ella se observa cómo se organizó por cada interfaz.

<pre> FUNCIONES BASE killDbConnections() SERVIDOR SHINY INICIA <function> (input, output, session) CONECTARSE EN BASE LOCAL selectData(fields, table, SortCol, WhereCl) insertData(table, field, values) INTERFAZ PROYECTOS displayReq() yearSelector() actualizaYearReq() desplegaldReq() limpiarDatosReq() insertReq(idReq, nameReq, descReq, yearReq, scrReq, encReq) updateReq(idReq, nameReq, descReq, yearReq, scrReq, encReq) INTERFAZ GRAFICA DE MUESTRAS displaySam() yearSelectorMu() wktSelectorMu() actualizaYearReqMu() actualizadSamMu() desplegaldSamp() limpiarDatosMu() insertSam(txtIdSampMu, Requests_idReq, codInvSamp, modelSamp, productSamp, EtpTest_idEtpT, WorkTables_idWKT) updateSam(txtIdSampMu, Requests_idReq, codInvSamp, modelSamp, productSamp, EtpTest_idEtpT, WorkTables_idWKT) actualizaAllMu() INTERFAZ GRAFICA DE OPERACIONES displayOps() yearSelectorOps() actualizaYearReqOps() actualizadSamOps() limpiarDatosOps() desplegaldSampOps() ActualizaAllOps() IniOps(id_Samp, dtInsSamp, descInsSamp, descGralSamp, statSamp, dtIniSampA, dtIniSampB) StopOps(id_Samp, statSamp) ContOps(id_Samp, statSamp, dtStopSampA, dtStopSampB, acumSamp) EndOps(id_Samp, statSamp, dtStopSampA, dtStopSampB) EditOps(id_Samp, dtInsSamp, descInsSamp, descGralSamp, statSamp, dtIniSampA, dtIniSampB) TiempoTest() </pre>	<pre> INTERFAZ GRAFICA DE CHECKLIST yearSelectorChk() actualizaYearReqChk() actualizadSamChk() actualizaCheckListChk() limpiarDatosChk() desplegaldChkA() desplegaldChk() ActualizaAllChk() RegisterCheckList() DeleteCheckList() INTERFAZ GRAFICA DE AUDITORIAS yearSelectorAud() actualizaYearReqAud() actualizadSamAud() actualizaAuditsAud() limpiarDatosAud() desplegaldAudA() desplegaldAud() ActualizaAllAud() RegisterAud() DeleteAud() INTERFAZ GRAFICA DE FALLAS yearSelectorFail() actualizaYearFail() limpiarDat() desplegaA() desplegad() ActualizaAllA() RegisterA() DeleteA() </pre>
--	--

Fig. 43 Navegador del script de la programación.

En el siguiente link se puede descargar el código en R de las pantallas:

<https://drive.google.com/open?id=11Tar-0-2PtQggfw2-xhKg80SLqWlEKmJD>

8.4 Código en R para analizar la confiabilidad de un modo de falla.

8.4.1 Código

```
confia.uaq<-function(lavadoras,duracion,TTFs){
#Carga de librerias
library(survival)
library(flexsurv)
library(ranger)
library(ggplot2) # Graficos
library(ggfortify) # Graficos con surv
library(survminer) # Graficos

#Preparación de estructura de datos
if(lavadoras>0)
  data1<-data.frame(TTF=c(duracion),Falla=c(0))
lavadoras=lavadoras-1
for(i in 1:lavadoras){
  data1<-rbind(data1,c(duracion,0))
}

fallas<-dim.data.frame(TTFs)[2]
if(fallas>0)
  data2<-data.frame(TTF=TTFs[1],Falla=c(1))
if(fallas>1){
  for(j in 2:fallas){
    data2<-rbind(data2,c(TTFs[j],1))
  }
}

centestruct18<-rbind(data2,data1)

#Preparación de información para estructura de datos "survival"

object1<-Surv(time = centestruct18$TTF, event = centestruct18$Falla) ~ 1

#Evaluacion por funciones estadísticas paramétricas
exponential<-flexsurvreg(formula = object1,dist = "exp",data = centestruct18)
weibull<-flexsurvreg(formula = object1,dist = "weibull",data = centestruct18)
lognormal<-flexsurvreg(formula = object1,dist = "lnorm",data = centestruct18)
loglogistic<-flexsurvreg(formula = object1,dist = "llogis",data = centestruct18)

#Resultados se agregan a variables para posteriormente agregarlos a una tabla.
shape<-c(weibull$res[1,1],lognormal$res[1,1],exponential$res[1,1],loglogistic$res[1,1],NA)
scale<-c(weibull$res[2,1],lognormal$res[2,1],NA,loglogistic$res[2,1],NA)
Escalas<-data.frame(Dist=c("Weibull","lognorm","exp","loglogistic","RF"),shape,scale)
Loglikelihood<-c(weibull$loglik,
  lognormal$loglik,
  exponential$loglik,
  loglogistic$loglik,NA)
AIC<-c(weibull$AIC,
  lognormal$AIC,
  exponential$AIC,
  loglogistic$AIC,NA)
mttf.wei<-weibull$res[2,1]*gamma((weibull$res[2,1]+1)/weibull$res[2,1])
mttf.exp<-1/exponential$res[1,1]
mttf.lognormal<-exp(lognormal$res[1,1]+1/2*((lognormal$res[2,1])^2))
mttf.loglogistic<-(loglogistic$res[2,1]*(pi/loglogistic$res[1,1]))/sin(pi/loglogistic$res[1,1])
MTTF<-c(mttf.wei,mttf.lognormal,mttf.exp,mttf.loglogistic,NA)
MTTFxAño<-MTTF/400
Method<-c("Weibull","Lognormal","Exponential","Loglogistic","Random Forest")
MMTFTab<-data.frame(Method,MTTF,MTTFxAño)

# Grafica de curvas de confiabilidad por modelos de confiabilidad estadísticos

par(mfrow=c(2,2))
```

```

plot(1-pweibull(c(1:duracion),shape = weibull$res[1,1],scale =weibull$res[2,1], lower.tail = T),col="black",type =
"l",lwd=2,main="Weibull distribution",ylab="Reliability",xlab="Time (hours)",ylim=c(.85,1))
lines(1-pweibull(c(1:duracion),shape = weibull$res[1,2],scale =weibull$res[2,2], lower.tail = T),col="black",type =
"l",lty=2,main="Weibull distribution",ylab="Reliability",xlab="Time (hours)")
lines(1-pweibull(c(1:duracion),shape = weibull$res[1,3],scale =weibull$res[2,3], lower.tail = T),col="black",type =
"l",lty=2,main="Weibull distribution",ylab="Reliability",xlab="Time (hours)")

plot(1-pexp(c(1:duracion),rate = exponential$res[1,1], lower.tail = T),col="black",type = "l",lwd=2,main="Exponential
distribution",ylab="Reliability",xlab="Time (hours)",ylim=c(.85,1))
lines(1-pexp(c(1:duracion),rate = exponential$res[1,2], lower.tail = T),col="black",type = "l",lty=2,main="Exponential
distribution",ylab="Reliability",xlab="Time (hours)")
lines(1-pexp(c(1:duracion),rate = exponential$res[1,3], lower.tail = T),col="black",type = "l",lty=2,main="Exponential
distribution",ylab="Reliability",xlab="Time (hours)")

plot(1-plnorm(c(1:duracion),meanlog = lognormal$res[1,1] ,sdlog = lognormal$res[2,1] , lower.tail =
T),col="black",lwd=2,type = "l",main="Lognormal distribution",ylab="Reliability",xlab="Time (hours)",ylim=c(.85,1))
lines(1-plnorm(c(1:duracion),meanlog = lognormal$res[1,2] ,sdlog = lognormal$res[2,2] , lower.tail = T),col="black",type =
"l",lty=2,main="Lognormal distribution",ylab="Reliability",xlab="Time (hours)")
lines(1-plnorm(c(1:duracion),meanlog = lognormal$res[1,3] ,sdlog = lognormal$res[2,3] , lower.tail = T),col="black",type =
"l",lty=2,main="Lognormal distribution",ylab="Reliability",xlab="Time (hours)")
plot(1-pllogis(c(1:duracion),shape =loglogistic$res[1,1] ,scale = loglogistic$res[2,1] , lower.tail = T),col="black",lwd=2,type =
"l",main="Loglogistic distribution",ylab="Reliability",xlab="Time (hours)",ylim=c(.85,1))
lines(1-pllogis(c(1:duracion),shape =loglogistic$res[1,2] ,scale = loglogistic$res[2,2] , lower.tail = T),col="black",type =
"l",lty=2,main="Loglogistic distribution",ylab="Reliability",xlab="Time (hours)")
lines(1-pllogis(c(1:duracion),shape =loglogistic$res[1,3] ,scale = loglogistic$res[2,3] , lower.tail = T),col="black",type =
"l",lty=2,main="Loglogistic distribution",ylab="Reliability",xlab="Time (hours)")
par(mfrow=c(1,1))

#Evaluación de confiabilidad por Random Forest
rrf18<-ranger(Surv(TTF,Falla)~Falla,
              data= centestruct18,num.trees = 10000,mtry=1,importance = "permutation",splitrule = "extratrees",verbose = T)

# Grafica de curvas de confiabilidad por Ranfom Forest
deathtimes<-rrf18$unique.death.times
surv_prob<-data.frame(rrf18$survival)
avg_prob<-sapply(surv_prob,mean)

plot(rrf18$unique.death.times,rrf18$survival[1,], type="l",lty=2,col="red",main="RSF method",ylab="Reliability",xlab="Time
(hours)")
for (n in sample(c(2:dim.data.frame(centestruct18)[1])))

# donde dim.data.frame(centestruct18)[1] debe ser el tamaño del data frame del paso 2
{
  lines(rrf18$unique.death.times,rrf18$survival[n,],type="l",lty=2,col="red")
}
lines(deathtimes,avg_prob,type="l",col="black",lwd=3)
legend(500,.7,legend = c("RF average = Black"))
deathtimes2<-c(0,deathtimes)
avg_probx<-c(1,avg_prob)

#Agregar datos/resultados de Random Forest a tabla llamada Analisis
AUROC_RF<- 1-rrf18$prediction.error
Method<-c("Weibull","Lognormal","Exponential","Loglogistic","Random Forest")
AUROC<-c(NA,NA,NA,NA, AUROC_RF)
Analysis<-data.frame(Method,Loglikelihood,AIC,AUROC)

# Evaluacion de confiabilidad por Kaplan Meier
kmrel<-survfit(Surv(centestruct18$TTF,centestruct18$Falla)~1)
plot(kmrel,main="Kaplan-Meier")
#ggsurvplot(kmrel,centestruct18,color = "red",main="Kaplan-Meier")

# Obtencion de datos para la evaluación del MSE.
kmi <- rep("KM",length(kmrel$time))
km_df <- data.frame(kmrel$time,kmrel$surv,kmi)
names(km_df) <- c("Time", "Surv", "Model")
rfi <- rep("RF",length(rrf18$unique.death.times))
rf_df <- data.frame(rrf18$unique.death.times,avg_prob,rfi)

```

```

names(rf_df) <- c("Time", "Surv", "Model")
wei<-rep("Weibull", (fallas+1)) # de TTF + 1
wei_df<-data.frame(rrf18$unique.death.times, (1-pweibull(rrf18$unique.death.times, shape = weibull$res[1,1], scale
=weibull$res[2,1], lower.tail = T)), wei)
names(wei_df) <- c("Time", "Surv", "Model")
lnorm<-rep("Lognorm", (fallas+1))
lnorm_df<-data.frame(rrf18$unique.death.times, (1-plnorm(rrf18$unique.death.times, meanlog = lognormal$res[1,1], sdlog =
lognormal$res[2,1], lower.tail = T)), lnorm)
names(lnorm_df) <- c("Time", "Surv", "Model")
expon<-rep("Exp", (fallas+1))
exp_df<-data.frame(rrf18$unique.death.times, (1-pexp(rrf18$unique.death.times, rate = exponential$res[1,1], lower.tail =
T)), expon)
names(exp_df) <- c("Time", "Surv", "Model")
logict<-rep("Loglogistic", (fallas+1))
llogis_df<-data.frame(rrf18$unique.death.times, (1-pllogis(rrf18$unique.death.times, shape =loglogistic$res[1,1], scale =
loglogistic$res[2,1], lower.tail = T)), logict)
names(llogis_df) <- c("Time", "Surv", "Model")

#Evaluacion del Mean sqaured error (MSE)
msewei<-sum(((wei_df$Surv)-(km_df$Surv))^2)/(fallas+1) # (fallas+1) es el numero de TTF+1
mselnorm<-sum(((lnorm_df$Surv)-(km_df$Surv))^2)/(fallas+1)
mseexp<-sum(((exp_df$Surv)-(km_df$Surv))^2)/(fallas+1)
msellogis<-sum(((llogis_df$Surv)-(km_df$Surv))^2)/(fallas+1)
mserf<-sum(((rf_df$Surv)-(km_df$Surv))^2)/(fallas+1)
Minimo<-data.frame(Method, MSE=c(msewei,mselnorm,mseexp,msellogis,mserf))

#Se agregan todos los resultados a la tabla resumen
resumen<-
(data.frame(Method, Escalas$shape, Escalas$scale, Analysis$Loglikelihood, Analysis$AIC, Analysis$AUROC, MMTFTab$MTTF
, MMTFTab$MTTFxAño, Minimo$MSE))
View(resumen)
}

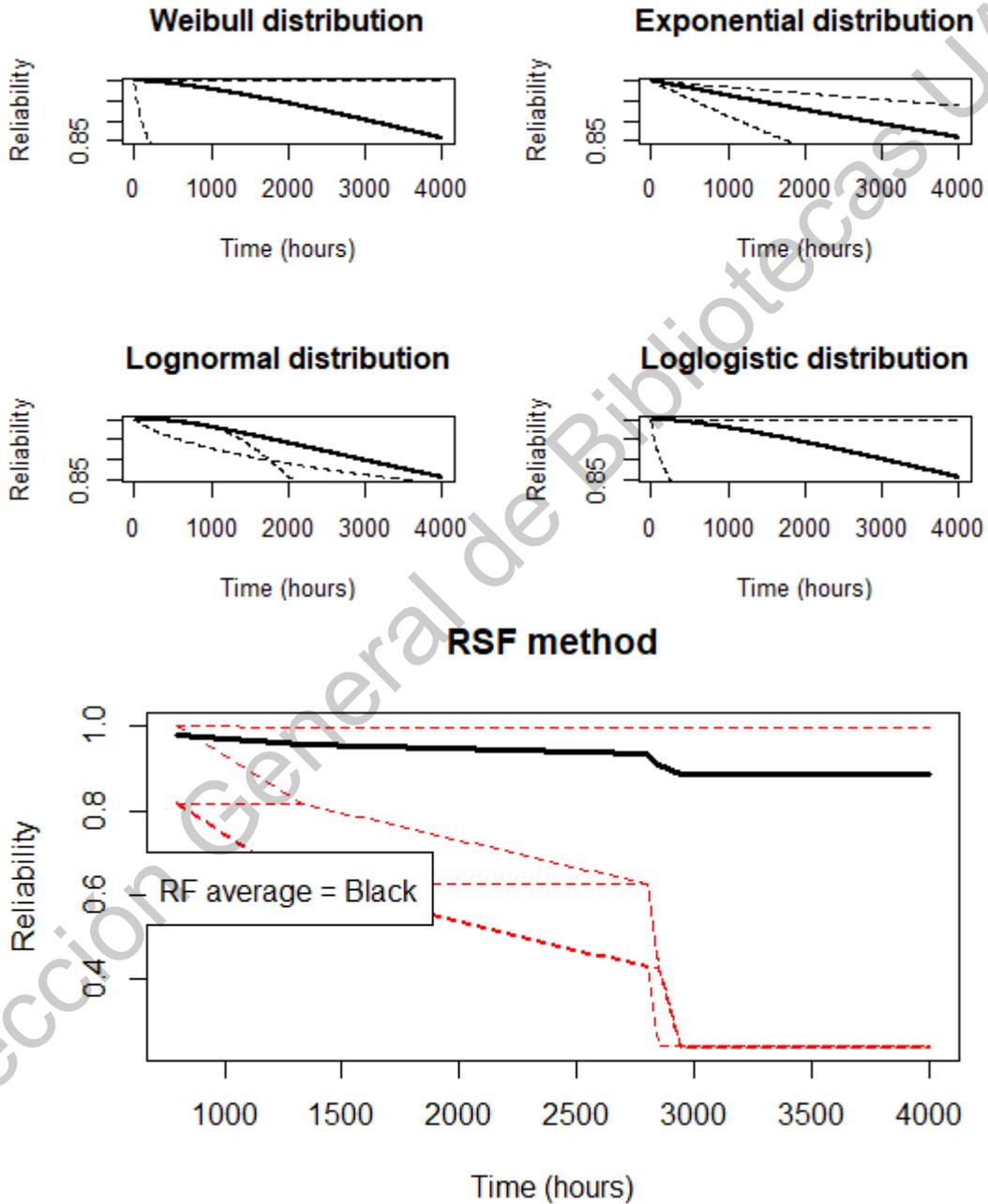
```

8.4.2 Ejemplo de uso de la función

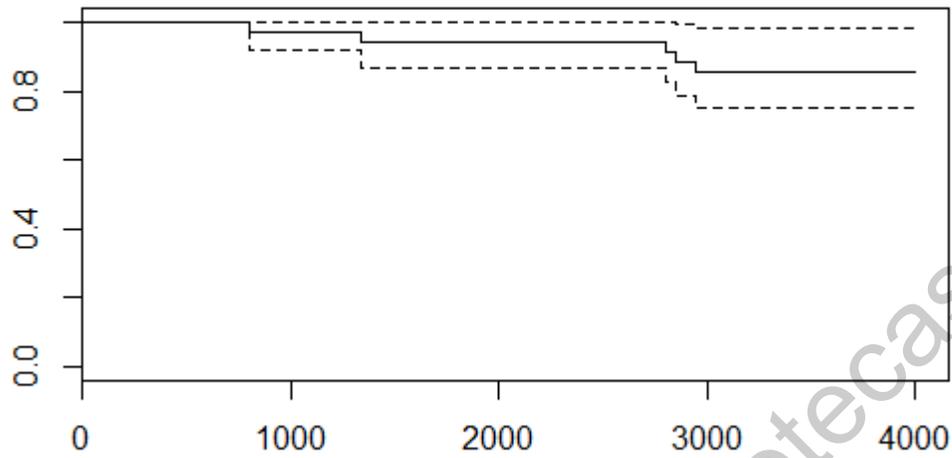
Entrada:

confia.uaq(lavadoras = 30,duracion = 4000,TTFs = c(800,1340,2800, 2850, 2944))

Salida:



Kaplan-Meier



<i>Method</i>	<i>Parameter 1</i>	<i>Parameter 2</i>	<i>Analysis Loglikelihood</i>	<i>Analysis AIC</i>	<i>Analysis AUROC</i>	<i>MSE</i>
Weibull	1.410038024	14984.35919	-55.58273	115.1655	NA	0.000580766
Lognormal	9.758569007	1.381939	-55.39211	114.7842	NA	0.000518435
Exponential	3.82456E-05	NA	-55.85741	113.7148	NA	0.000291672
Loglogistic	1.472348691	13371.29042	-55.54796	115.0959	NA	0.000554089
Random Forest	NA	NA	NA	NA	0.9375	0.000502599