



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
SISTEMAS – INGENIERÍA INDUSTRIAL

**ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD DE FUNCIONAMIENTO DEL TREN LIGERO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
BEATRIZ ADRIANA OLIVERA VILLA

TUTORA PRINCIPAL
FRANCISCA SOLER ANGUIANO, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. JUNIO, 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Idalia Flores De La Mota

Secretario: M.I. Arturo Fuentes Zenón

Vocal: M.I. Francisca Irene Soler Anguiano

1^{er.} Suplente: M.I. Ann Godelieve Wellens Purnal

2^{do.} Suplente: Dra. Mayra Elizondo Cortés

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: México, D.F.

TUTOR DE TESIS:

FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO

FIRMA

(Segunda hoja)

Dedicatoria

Para papá, dondequiera que esté.

Índice

Resumen	4
Abstract.....	5
Introducción.....	6
Objetivos específicos.....	7
Capítulo 1: Marco teórico	8
Sección I. Teoría de confiabilidad.....	8
1.1 Definición de confiabilidad.....	8
1.2 Indicadores de la confiabilidad de un sistema	9
1.3 Factores que intervienen en la confiabilidad y medios para aumentarla	10
1.4 Copias de un sistema	10
1.5 Estructuras básicas	12
1.5.1 Sistema serie	12
1.5.2 Sistema paralelo	12
1.5.3 Sistema k de n.....	13
1.6 Capacidad de funcionamiento	13
1.7 Funciones de estado	14
1.8 Definición de falla	14
1.8.1 Proceso evolutivo de una falla	15
1.8.2 Duración de la vida de un equipo	16
1.9 Clasificación de fallas.....	16
1.10 Análisis ABC	17
1.11 Definición de mantenibilidad.....	18
1.12 Definición de disponibilidad	19
Sección II. Antecedentes de probabilidad.....	20
1.13 Funciones de probabilidad generalmente usadas en confiabilidad	20
1.13.1 Distribución binomial.....	20
1.13.2 Distribución de Poisson	21
1.13.3 Distribución de Rayleigh	21
1.13.4 Distribución de Weibull.....	22
1.13.5 Distribución exponencial.....	23
1.13.6 Distribución normal	23
1.13.7 Distribución gamma	23
1.13.8 Funciones para la caracterización de la confiabilidad	24
1.14 Pruebas de bondad de ajuste.....	25
1.14.1 Prueba χ^2	25
1.14.2 Prueba Kolmogorov – Smirnov.....	26
1.14.3 Prueba Shapiro – Wills.....	27
1.14.4 Prueba Anderson – Darling	28
1.14.5 Prueba Cramér-von Mises.....	29
Sección III. Teoría de mantenimiento	29
1.15 Definición y tipos de mantenimiento	29
1.16 Niveles de mantenimiento.....	30
1.17 Mantenimiento productivo total (TPM)	31
1.18 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)	32
1.19 Estructura y objetivos de un plan de mantenimiento	33
1.20 Condiciones necesarias para la implantación de la política de mantenimiento.....	33
Capítulo 2. Metodología.....	35

2.1 Delimitar el objeto de estudio	37
2.2 Determinar las principales fallas: análisis ABC.....	37
2.3 Determinar las unidades críticas en el proceso	38
2.4 Obtener el modelo de comportamiento probabilístico.....	39
2.5 Realizar la prueba de bondad de ajuste.....	40
2.5.1 Metodología para realizar la prueba de Kolmogorov-Smirnov	40
2.6 Evaluar los resultados de la prueba de bondad de ajuste	42
2.7 Determinar parámetros importantes y graficar	43
2.8 Repetir el proceso para otras unidades críticas	43
2.9 Analizar resultados y proponer sugerencias	44
Capítulo 3: Estudio de caso	45
3.1 Descripción del objeto de estudio: el tren ligero.....	45
3.2 Encuestas de evaluación del servicio de tren ligero.....	46
3.2.1 Resultados de la encuesta.....	48
3.3 Descripción del parque vehicular del tren ligero.....	49
3.4 Determinación de las fallas principales del tren ligero	51
3.5 Análisis ABC de las fallas del tren ligero	54
3.6 Determinación de las unidades críticas: trenes con mayor índice de fallas.....	56
3.7 Determinación del modelo probabilístico para el tren 26.....	58
3.8 Determinación e interpretación de parámetros importantes para el tren 26	63
3.9. Análisis de resultados y propuestas.....	67
Conclusiones	69
Referencias bibliográficas.....	70
Referencias electrónicas.....	71
Anexo 1. Fallas del tren ligero por año	75
Anexo 2. Tabla de datos sobre el tiempo de ocurrencia de fallas	76
Anexo 3. Prueba de bondad de ajuste tren 26.....	79
Anexo 4. Prueba de bondad de ajuste a datos modificados.....	83
Apéndice 1. Determinación del modelo probabilístico y parámetros de confiabilidad para el tren 32	85
Apéndice 2. Encuesta de evaluación del servicio del tren ligero.....	87

Resumen

La primera parte de esta tesis brinda un marco teórico de las herramientas de confiabilidad adecuadas para el objeto de estudio y rescata los conceptos teóricos más importantes relacionados con el análisis de confiabilidad. Este marco contiene también la descripción de los principales tipos de mantenimiento y filosofías enfocadas a la mejora continua que podrían aplicarse al objeto de estudio planteado.

El siguiente apartado es una descripción de la metodología usada para llevar a cabo un análisis de confiabilidad, incluyendo análisis estadístico de las fallas, así como el análisis probabilístico de los tiempos de falla de cada uno de los trenes que se analizaron en el capítulo posterior.

La parte final se refiere al caso de aplicación; para este apartado, se usaron las estadísticas y bitácoras de mantenimiento de los trenes que forman parte del Servicio de Transportes Eléctricos (STE) para un periodo de cuatro años. Con base en estos datos, se realizó un análisis ABC de fallas para determinar las más frecuentes e importantes. Posteriormente, se analizó el modelo probabilístico de los tiempos de falla de los trenes con mayor número de incidencias, suponiendo que los tiempos correspondían a una distribución de probabilidad exponencial, para ello se realizaron pruebas de bondad de ajuste. A través de este análisis se determinaron parámetros importantes como es el tiempo medio de buen funcionamiento, la tasa de fallas y las curvas de confiabilidad de los trenes más críticos.

En la última parte del trabajo se identificaron las principales fallas de funcionamiento del tren ligero, esto sirvió para aportar elementos a la dirección de la empresa para realizar los planes de mantenimiento global al sistema, así como a cada uno de los trenes y a los que presentan un comportamiento más crítico y realizar propuestas de mejora en general.

Abstract

The first part of this thesis provides a theoretical framework of the reliability tools suitable for the purpose of study. It also rescues the most important theoretical concepts related to reliability analysis. This framework also contains a description of the main types of maintenance and philosophies focused on the continuous improvement which could be applied to the purpose of study set out.

The following section is a description of the methodology used to conduct a reliability analysis, including statistical analysis of failures just like the probabilistic analysis of time failures of each of the trains that will be analyzed in the next chapter.

The final part refers to the case of application. For this section, the statistics and maintenance logs of the trains, that are part of the Electric Transport Service (ETS), were used during a period of four years. Based on these data, we performed an ABC failure analysis to determine the most frequent and important failures. Subsequently, we analyzed the probabilistic model of time failures of the trains with a greater number of incidents. Through this analysis, important parameters such as average time of a well functioning, the failure rate and reliability curves of the most critical trains were used.

In the last part of the work, we identified the main malfunctions of the light rail. This served to provide elements to the course of the company to give a comprehensive maintenance plan to the system, to each of the trains and especially to those that have the most critical situation and to make suggestions for an overall improvement.

Introducción

El tren ligero opera en el sur de la ciudad de México en una de las zonas que ha presentado un gran crecimiento poblacional y por ende, amplia demanda de transporte.

El transporte eléctrico ocupa un nivel de suma importancia en algunas de las ciudades más importantes. Ríos (2011) señala que el tranvía hace parte de los medios de transporte masivos utilizados en las principales ciudades de Europa, parte de Asia y Australia. Sin embargo, en el D.F., este medio ha mostrado escaso crecimiento, únicamente cuenta con una línea de operación en la zona sur de la ciudad pese a sus grandes beneficios. Es un modo de transporte que tiene las características de semiconfinamiento, es decir, opera en vialidades reservadas pero presenta cruces en sus intersecciones. A pesar de la sobreoferta de transporte concesionado en la zona sur, éstos no ofrecen la rapidez, seguridad y sustentabilidad del tren ligero, caracterizado por sus bajos niveles de emisiones de bióxido de carbono (CO₂) en la ciudad. Aunado a lo anterior, el tren ligero ofrece rapidez, seguridad y accesibilidad a usuarios con capacidades diferentes, así como a diversos sectores de la población; señala Canese (2006) que el impulso del transporte eléctrico permitirá, además, mejorar considerablemente la calidad del aire de las ciudades, descongestionar las principales vías de acceso a la ciudad, ahorrar tiempo de viaje de pasajeros.

Para cualquier empresa de transporte de pasajeros, el mantenimiento dado a los vehículos debe ser una prioridad, dado que es necesario asegurar la utilización de los equipos con máxima disponibilidad, lograr una correcta operación y conservación de los mismos, contribuir a la seguridad del usuario, así como realizar las actividades de operación al mínimo costo. Luego entonces, el mantenimiento dado a los vehículos o trenes del servicio de transporte eléctrico de la ciudad de México, -pese a que se trate de una empresa descentralizada-, debe ser considerado una actividad prioritaria, ya que cualquier deficiencia o falla en el servicio puede repercutir en la calidad del mismo con un impacto directo en los usuarios; por ejemplo, los retrasos ocasionados a cientos de personas por fallas en el servicio. Aunque también existe un impacto directo en las finanzas, por ejemplo, los costos que se generan al reparar una falla en sitio, por no haberla atendido a tiempo, o el dinero que deja de percibirse cuando un tren es retirado de la operación para repararse.

Normalmente, la aplicación de estrategias de mantenimiento efectivas, puede aportar grandes ahorros para aquellas empresas que analizan sus componentes, equipos, etc., y que usan estrategias adecuadas para cada uno de sus activos. De manera casi generalizada, algunas empresas operan sus equipos hasta el fallo o en el mejor de los casos ofrecen mantenimiento preventivo, pero son escasas aquellas compañías que realizan de manera cotidiana mantenimiento basado en confiabilidad, ésta herramienta involucra procesos de mejora continua y metodologías de diagnóstico usadas en forma sistemática. Para el caso específico de este trabajo, realizar un análisis de confiabilidad, permitirá identificar componentes críticos, fallas principales,

frecuencias de falla y tiempos medios de reparación y de buen funcionamiento, elementos que de involucrarse en el quehacer cotidiano, servirán de base a la dirección de la empresa para mejorar su plan de mantenimiento.

La realización de este trabajo permitirá evaluar la confiabilidad del sistema y detectar las fallas principales de sus componentes: mecánico, eléctrico, neumático, etc., así como dar elementos a la dirección de la empresa para que se incorporen nuevas políticas en el mantenimiento de los equipos. Cabe señalar que la realización de propuestas concretas queda fuera del alcance de este trabajo y únicamente se mencionarán aquellas filosofías que permitan servir para mejorar el mantenimiento, por lo que este trabajo se limita a realizar un análisis de las fallas de los trenes, a identificar aquellos que tienen un comportamiento crítico, a elaborar las curvas de la función de densidad (que indican la probabilidad de falla en un determinado tiempo), las curvas de la función de distribución acumulada, (que representan la probabilidad de falla antes de un determinado tiempo y la curva de la función de confiabilidad (que representa la probabilidad de no presentar falla en un instante dado).

La información sólo será útil si se toman las decisiones correctas y oportunas para mejorar los planes de mantenimiento, basadas en criterios técnicos y no subjetivos y/o políticos, y por ende, si esto contribuye a brindar un mejor servicio a los usuarios finales. Dado lo anterior, el objetivo de esta tesis es **identificar las principales fallas de funcionamiento del tren ligero de la ciudad de México, utilizando herramientas de confiabilidad con el fin de mejorar su plan de mantenimiento.**

Objetivos específicos

- Identificar las herramientas más usadas en la teoría de confiabilidad adecuadas para el objeto de estudio.
- Identificar y determinar los principales componentes críticos, frecuencias de falla y los modelos de las funciones de probabilidad y de confiabilidad, que permitan brindar información útil acerca del comportamiento de las fallas de los trenes.
- Proporcionar los elementos teóricos acerca de las propuestas de mantenimiento que pueden utilizarse para mejorar el mantenimiento del tren ligero, así como sugerencias de mejora en general.

Capítulo 1: Marco teórico

*Si algo puede salir mal, saldrá mal (y en el peor momento posible)
La ley de Murphy*

Sección I. Teoría de confiabilidad

1.1 Definición de confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo, equipo o sistema, realice adecuadamente su función prevista a lo largo del tiempo, cuando opera en el entorno para el que ha sido diseñado bajo las condiciones indicadas. La confiabilidad desempeña un aspecto esencial en la seguridad de un sistema. Huerta (2005) señala que es la probabilidad de que un equipo o sistema opere sin falla por un determinado periodo de tiempo, bajo condiciones de operación previamente establecidas. La definición de Amstadter (1976) refiere que es la probabilidad de que un dispositivo funcione adecuadamente durante un periodo dado en su aplicación prevista.

La confiabilidad es una disciplina científica que estudia procesos, actividades y factores relacionados con la habilidad de un producto o dispositivo para mantener su funcionamiento en las condiciones de utilización durante un tiempo de operación determinado.

El análisis de confiabilidad es necesario desde la primera etapa del ciclo de vida de un equipo, es decir; desde la fase de diseño. Así, durante el diseño del equipo se debe garantizar que el mismo cumpla con requisitos mínimos en términos de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. Una vez concluido el diseño de un producto, se debe validar si el equipo cumplirá estos requisitos durante su vida útil. Los equipos se diseñan para funcionar de una manera determinada bajo particulares conjuntos de condiciones (ambientales y operativas). El seguimiento de la confiabilidad en los equipos permite retroalimentar la fase de diseño y corregir problemas que puedan surgir en los niveles de confiabilidad y, en definitiva, llevar a cabo mejoras del producto.

Para realizar el seguimiento de los requisitos de confiabilidad, es posible el manejo de una serie de parámetros que permiten conocer el estado del equipo respecto a los diferentes factores que engloban la confiabilidad, los cuales se encuentran relacionados entre sí. De esa forma, garantizar la confiabilidad y disponibilidad adecuada resulta posible si se consigue un buen diseño, se realiza mantenimiento adecuado y se persigue la mejora continua del diseño y del mantenimiento.

De acuerdo con la figura 1, la confiabilidad es directamente proporcional al área bajo la curva, entre más confiable es un sistema, más larga es el área. La confiabilidad puede ser expresada como la longitud de la operación T, durante la cual el dispositivo bajo consideración mantiene su funcionamiento cuando es usado bajo las condiciones especificadas.

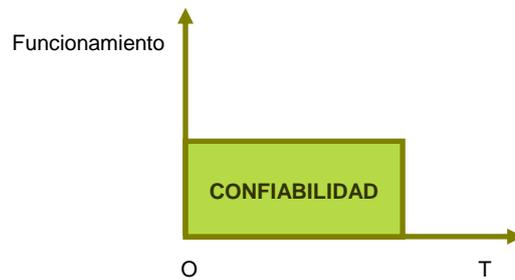


Figura 1. Confiabilidad de un dispositivo determinado

La definición de confiabilidad implica tres conceptos:

- Funcionamiento satisfactorio
- Periodo de tiempo
- Aplicación prevista

El funcionamiento satisfactorio de un equipo no implica necesariamente un cumplimiento íntegro y total de todas las características funcionales del mismo, este criterio se establece de acuerdo con las necesidades del equipo. Una vez definidos los criterios de actuación satisfactoria, puede compararse con ellos el funcionamiento del equipo durante el periodo de tiempo requerido. Los criterios de aceptabilidad pueden variar en función del tiempo, de modo que lo considerado aceptable al final del periodo de funcionamiento, pudiera ser inferior a lo que era satisfactorio al comienzo.

El diseño de los equipos se realiza para que éstos funcionen bajo condiciones particulares (presión, temperatura, humedad, aceleración, vibración, tensión, par mecánico, intensidad eléctrica, etc.). Si el equipo falla o se degrada al usarlo bajo las condiciones particulares para las que fue diseñado, es insatisfactorio, pero si se somete a esfuerzos fuera de los límites especificados las fallas no necesariamente son indicadores de la falta de confiabilidad del sistema.

1.2 Indicadores de la confiabilidad de un sistema

De acuerdo con O'Connor (1985) se puede cuantificar a la confiabilidad como el número medio de fallos en un tiempo determinado (MTBF), para equipos que son reparados y vueltos a usar. A continuación se determinan los parámetros o indicadores de la confiabilidad de un sistema.

- **Frecuencia de falla:** número de veces que falla cualquier componente del sistema.
- **Tasa de fallas:** número de fallas en un determinado tiempo, es un estimador importante de la confiabilidad de un sistema.

$$Tasa\ de\ fallas = \frac{Número\ de\ fallas}{tiempo}$$

- **Impacto en la operación:** es el porcentaje de producción o nivel de servicio que se afecta cuando ocurre la falla.
- **Nivel de servicio o producción:** es la capacidad que se deja de producir cuando ocurre la falla.
- **Tiempo promedio para reparar:** es el tiempo para reparar la falla.
- **Costo de reparación:** costo de reparación del sistema.
- **Impacto en seguridad:** probabilidad de ocurrencia de fallas con daños a personas.
- **Impacto ambiental:** probabilidad de ocurrencia de fallas con daños al ambiente.
- **MTBF** = promedio de tiempos de buen funcionamiento durante un periodo dado de la vida del equipo o *Mean Time Between Failure*.

1.3 Factores que intervienen en la confiabilidad y medios para aumentarla

El funcionamiento operativo de un sistema depende de la efectividad conjunta de los factores siguientes:

- Sistema físico
- Factores humanos

Existen diversos medios para aumentar la confiabilidad, estos buscan evitar y prevenir las amenazas y cuando no es posible buscan controlar dicha situación y en algunos casos se examina que el proceso siga funcionando, aunque esto afecte su desempeño y acorte su vida.

Los medios para aumentar la confiabilidad se dividen en:

- **Prevención de fallas:** Busca prevenir la ocurrencia o introducción de fallas.
- **Tolerancia a fallas:** Busca que el proceso dé un servicio correcto aún en presencia de fallas y se implementa generalmente mediante la detección de errores.
- **Eliminación de fallas:** Trata de reducir el número o severidad de las fallas y se realiza durante la fase de desarrollo del sistema y durante su vida de operación útil.
- **Predicción de fallas:** Trata de estimar el número de fallas presentes, la incidencia futura y las probables consecuencias de éstas. (Avizienis, 2001, citado por Méndez 2008).

1.4 Copias de un sistema

Las copias de un dispositivo son aquellas que tienen características de diseño y modo de producción idénticas.

Cuando existen varias copias de sistemas o dispositivos que se encuentran sujetas a las mismas condiciones de operación, funcionamiento y desempeño,

se infiere que cada una de estas reproducciones o copias perderá su capacidad de funcionamiento en un diferente instante del tiempo de operación.

Sin embargo, a pesar de que las copias de un sistema poseen características idénticas de diseño, existen factores que influyen en la confiabilidad de los mismos, tales factores se encuentran clasificados de la siguiente forma:

- a) Factores inherentes al producto: aquellos relacionados con el material de fabricación, manufactura y proceso de ensamble, control de calidad aplicado a cada producto, empaque inicial, transporte y almacenamiento de cada copia aplicado al inicio de la operación.
- b) Factores ambientales: Como la temperatura, humedad, concentración de pH, polvo, radiación, vibraciones, etc.
- c) Factores operacionales: carga, número de ciclos por unidad, intensidad de uso, frecuencia de uso, capacitación técnica de los usuarios, etc.
- d) Factores de gestión o administración del sistema.

La variación del tiempo de falla para cada copia es resultado de la influencia de algunos de los factores antes citados y las interacciones entre ellos, es decir; el tiempo de falla depende directamente de la variabilidad de aquellos parámetros y las relaciones entre ellos, de manera gráfica se muestra en la figura 2 el tiempo de falla de varias copias de un dispositivo y puede ser expresado de la siguiente forma:

$$T = f(\text{factores inherentes al producto, factores ambientales, factores operacionales})$$

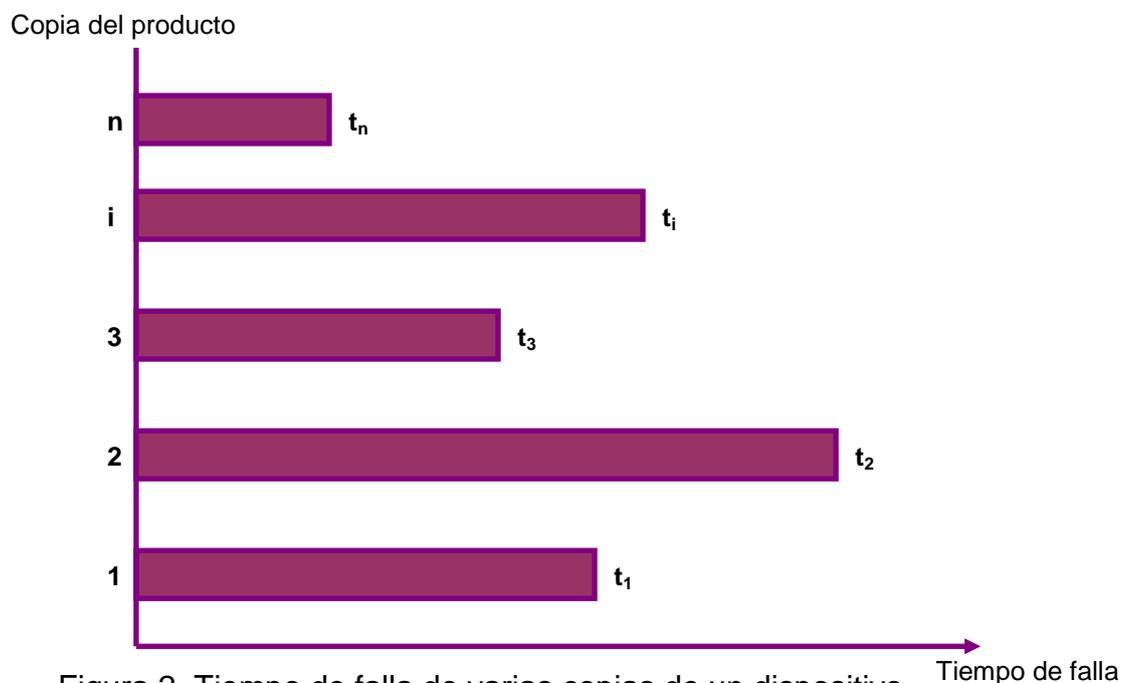


Figura 2. Tiempo de falla de varias copias de un dispositivo

Para analizar la confiabilidad de un producto, es necesario aplicar la teoría de probabilidad como herramienta para describir la relación definida por la ecuación antes citada.

1.5 Estructuras básicas

Existen tres tipos genéricos de relaciones estructurales o de redundancia entre un dispositivo y sus componentes. Estos son: 1) serie, 2) paralelo y 3) K de n.

La redundancia es el principal método para incrementar la confiabilidad, puede implicar el uso de dos o más componentes o conjuntos idénticos de forma que cuando uno falla, existan otros que realicen la función, o bien; puede incluir medios diferentes para realizarla.

1.5.1 Sistema serie

Es aquel en el que todos los componentes deben funcionar adecuadamente para que funcione el sistema. Sólo el funcionamiento de todos los componentes hace que el sistema lo haga. La figura 3 representa esquemáticamente este sistema.

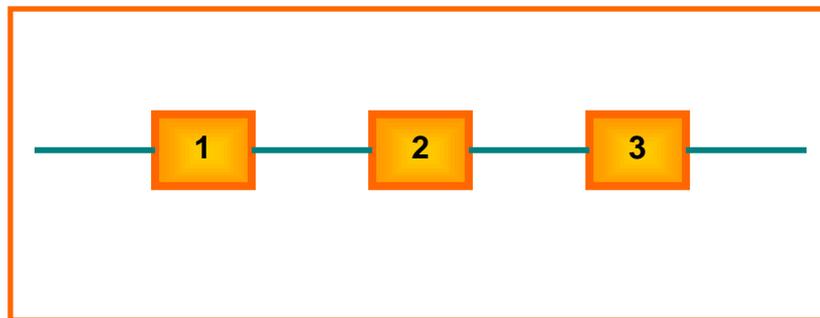


Figura 3. Sistema serie de tres componentes

1.5.2 Sistema paralelo

Es aquel en que el funcionamiento de cualquiera de los componentes implica el del sistema. La figura 4 representa esquemáticamente este sistema.

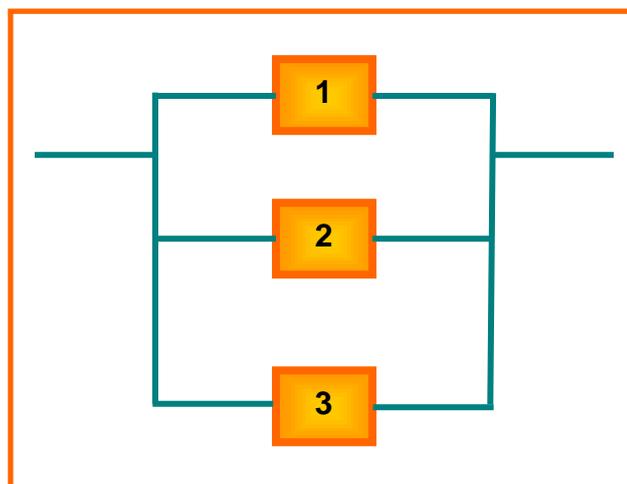


Figura 4. Sistema paralelo de tres componentes.

1.5.3 Sistema k de n

Es aquel en que el funcionamiento de k cualesquiera de los n componentes del sistema implica el del sistema. La figura 5 representa esquemáticamente este sistema.

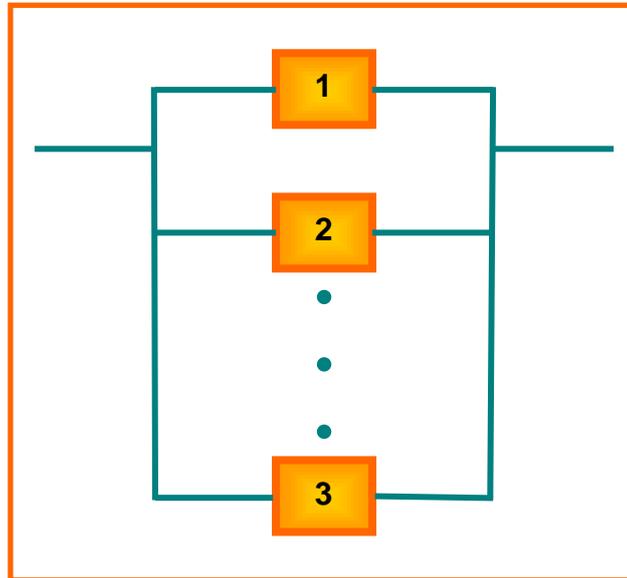


Figura 5. Sistema k de n

1.6 Capacidad de funcionamiento

Es la característica inherente a un producto, relacionada con su habilidad para desarrollar una función de acuerdo a los requerimientos y a las condiciones de operación especificadas. La figura 6 muestra esquemáticamente esta definición.

Las fallas pueden ser causadas por factores no inherentes al proceso, pueden ser ocasionadas por materiales de fabricación de las piezas, o bien por combinaciones de varios factores; lubricación de equipos, temperaturas de trabajo excesivas, sobrecarga de trabajo, dureza de los materiales, etc.

La falla de un producto puede ser definida como un evento cuya ocurrencia resulta en la pérdida de habilidad para desarrollar las funciones requeridas o la pérdida de habilidad para satisfacer los requerimientos especificados.

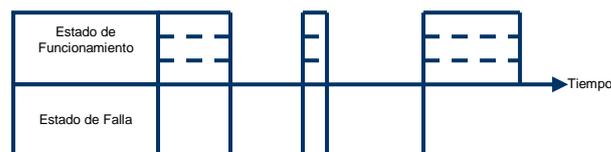


Figura 6. Capacidad de funcionamiento de un sistema reparable

1.7 Funciones de estado

Un atributo fundamental en el estudio de la confiabilidad es el funcionamiento correcto, algebraicamente un dispositivo tiene un estado ϕ donde:

$$\phi \begin{cases} 1 & \text{si el dispositivo funciona} \\ 0 & \text{si el dispositivo ha fallado} \end{cases}$$

Un dispositivo consta de n componentes, se supone que el estado del dispositivo está determinado por el estado de estos componentes:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Como el vector de estado de los componentes donde:

$$x \begin{cases} 1 & \text{si el componente funciona} \\ 0 & \text{si el componente ha fallado} \end{cases}$$

Entonces el estado del dispositivo (o sistema, ϕ , es una función del vector de estado de los componentes. $\phi = \phi(x)$.

1.8 Definición de falla

Una falla es la desviación de las características de un sistema, producto de sus valores nominales o de diseño (o rango de valores). Es la alteración o interrupción de un sistema en el cumplimiento de una función requerida. Amstadter (1976) señala que el fallo de una pieza o componente, no sólo da lugar a la pérdida del dispositivo fallado, sino que con mucha frecuencia produce también la pérdida de algún conjunto o sistema mayor del cual forma parte. Penkova (2007) también señala que algo falla, cuando deja de brindar el servicio que debía dar o cuando aparecen efectos indeseables, según las especificaciones de diseño con las que fue construido o instalado.

Las consecuencias de una falla pueden implicar desde retrasos de horario, incomodidades, quejas de clientes, pérdidas económicas hasta impactos gravísimos en cuestiones relacionadas con la seguridad, como el caso de fallas en aviones donde una falla puede provocar pérdidas invaluable como la vida, hasta fallas en instalaciones nucleares, donde los impactos podrían repercutir en la salud y medio ambiente y tener repercusiones en futuras generaciones.

Troyer (2010) en una recopilación de datos estadísticos de fallas, sugiere la siguiente distribución de causas de fallas en fábricas establecida en la figura 7.

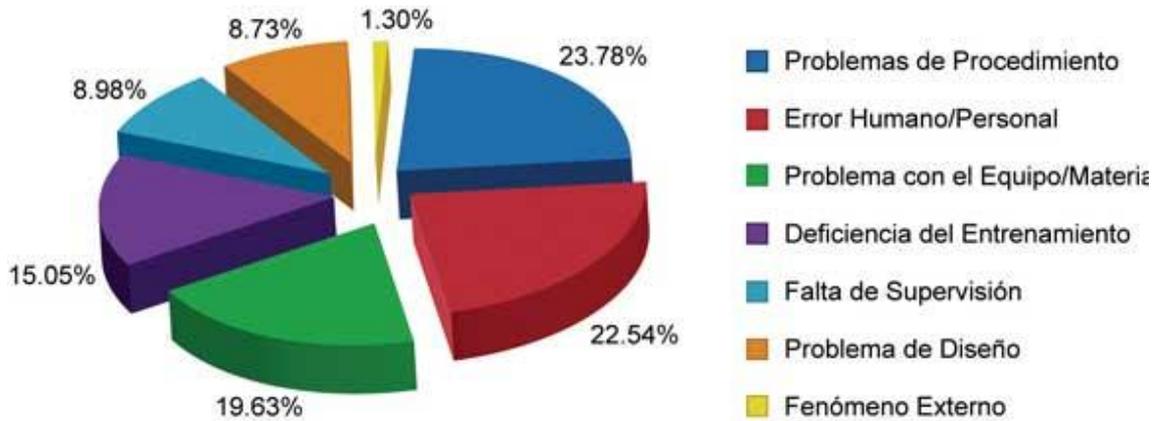


Figura 7. Causas de fallas en fábricas.

Tal como se muestra en la gráfica, el espectro es amplio y puede incluir problemas en el diseño, incompatibilidades entre materiales, condiciones ambientales, cambios en propiedades de los materiales, manuales ambiguos, confusos, etc. Lo anterior muestra que puede haber más de una causa para una falla y en ciertos casos, no hay una distinción totalmente clara entre las causas.

1.8.1 Proceso evolutivo de una falla

La figura 8 muestra el comportamiento de una falla por degradación, desde el inicio hasta que se da una pérdida de funcionamiento.

- Inicio: puede originarse por un defecto de fabricación o causa externa; golpe, sobrecarga, etc.
- Propagación: formas de fallos en funcionamiento (fatiga, desgaste).
- Pérdida de buen funcionamiento.

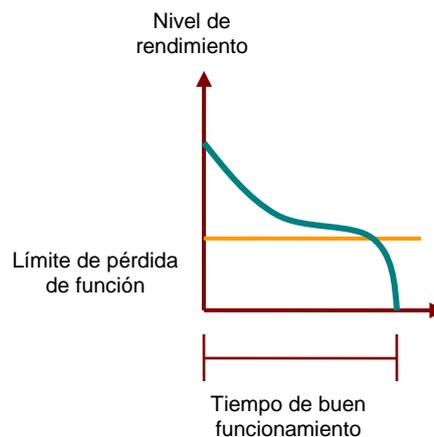


Figura 8. Comportamiento de una falla por degradación

1.8.2 Duración de la vida de un equipo

Se pueden distinguir tres fases en la vida de un equipo: juventud, madurez y obsolescencia y en cada una de ellas pueden presentarse fallas.

- Juventud (mortalidad infantil)
Se pueden presentar fallas durante la puesta en servicio, en el mismo estado de funcionamiento.
- Madurez (periodo de vida útil, fallos aleatorios)
Se distingue por un periodo de rendimiento óptimo del material, se presenta una tasa de fallas constante. Las fallas aparecen sin degradaciones previas visibles, por causas diversas.
- Obsolescencia
En esta etapa predomina una forma de fallo predominante, generalmente visible, da lugar a una degradación acelerada, con tasa de fallo creciente.

Típicamente, la representación de las fallas durante el periodo de vida útil de un sistema o equipo, sigue la forma mostrada en la figura 9, misma que se conoce como curva de la bañera; sin embargo, “la curva, concretamente en la parte final era fiable hace dos, tres o cuatro décadas, en las que la mayoría de los componentes se basaban en sistemas puramente mecánicos, neumáticos o hidráulicos. Hoy en día no es así, por lo que Fernández (2005) señala que cuando un determinado sistema empieza a fallar, se demuestra que en un 94% de los casos las actuaciones mejorativas posibles deben encaminarse a intervenciones modificativas.

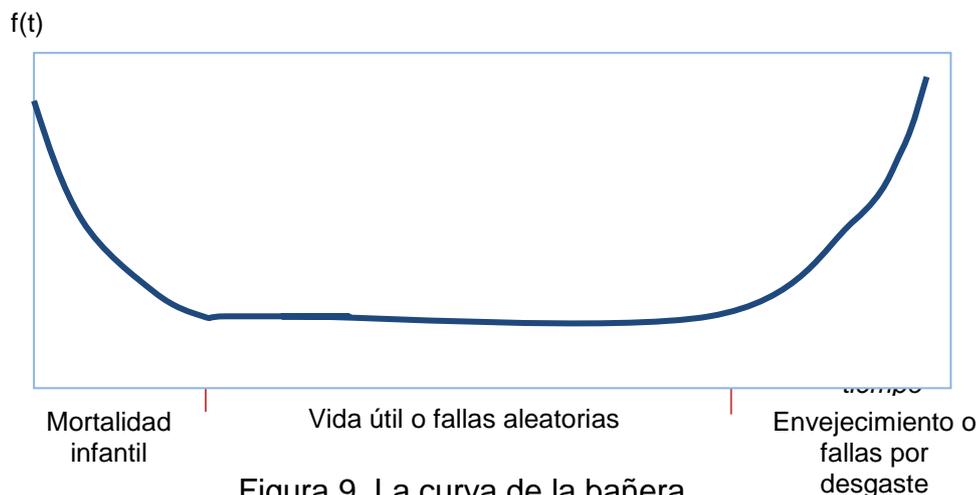


Figura 9. La curva de la bañera

1.9 Clasificación de fallas

Hay diversas clasificaciones de las fallas, una de ellas, la de Amstadter (1976), señala que las fallas pueden ser a) infantiles, b) aleatorias, c) debidas a desgaste y d) fallas por *fuera de tolerancias*.

Las fallas infantiles son debidas a defectos de la pieza como resultado de una deficiencia de diseño, fabricación o inspección.

La siguiente clasificación mostrada en la figura 10, es más específica y agrupa las fallas de acuerdo a la importancia de su presencia o criticidad.



Figura 10. Clasificación de fallas

1.10 Análisis ABC

El análisis ABC proviene del principio de Pareto, ésta es una importante herramienta cuyo objetivo es identificar los elementos prioritarios dentro de un conjunto de datos. La figura 11 muestra una curva ABC típica. La lógica del principio de Pareto consiste en separar lo importante de lo no importante, debe su nombre al economista italiano Vilefredo Pareto, quien estudió la distribución de la riqueza en Milán¹. Sin embargo, el principio tiene aplicación en diversas situaciones, ya que su lógica es muy sencilla, de acuerdo con Chase (2005), *unos cuantos tienen mucha importancia y muchos otros tienen poca importancia*.

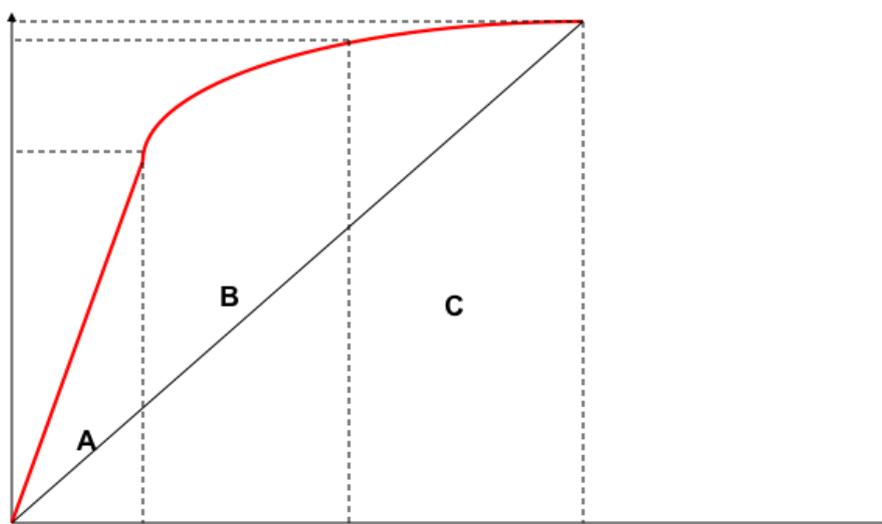


Figura 11. Curva ABC típica

¹ Pareto observó en su análisis, que una porción grande de la riqueza era propiedad de un pequeño

1.11 Definición de mantenibilidad

Amstadter (1976) define a la mantenibilidad como la probabilidad de que un dispositivo después de la falla sea puesto en un estado de funcionamiento dado y en un tiempo dado.

La mantenibilidad está relacionada con la duración de los tiempos de paro por mantenimiento, las características de la mantenibilidad son usualmente determinadas por el diseño del equipo, el cual determina los procedimientos de mantenimiento y la duración de los tiempos de reparación.

El objetivo de controlar o medir la mantenibilidad de un equipo, sistema o dispositivo, es optimizar o reducir tiempos de reparación para mantener una alta disponibilidad, de tal manera que sean minimizados los tiempos de paro de los equipos. El índice para medir la mantenibilidad de un equipo o sistema, es frecuentemente el tiempo medio entre reparaciones *mean time to repair* (MTTR) o tiempo promedio entre reparaciones.

La mantenibilidad es una disciplina científica que estudia actividades, factores y recursos relacionados con la restauración del funcionamiento de un producto desarrollando operaciones específicas de mantenimiento y métodos para cuantificar, predecir y mejorar sus características.

La contribución de la mantenibilidad es importante porque contribuye a la reducción de los costos de mantenimiento de un producto durante su operación, la teoría de la mantenibilidad es una herramienta que describe cuantitativamente la habilidad de los productos de ser restaurados desarrollando procesos de mantenimiento apropiados.

Mantenibilidad es la característica inherente de un producto, relacionada con su habilidad de ser restaurado cuando los procesos de mantenimiento y las rutinas de trabajo especificadas son desarrolladas conforme a parámetros de diseño establecidos.

La figura 12 muestra un esquema de la mantenibilidad de un sistema, donde T representa el instante de tiempo en el cual el proceso de mantenimiento ha sido completado.

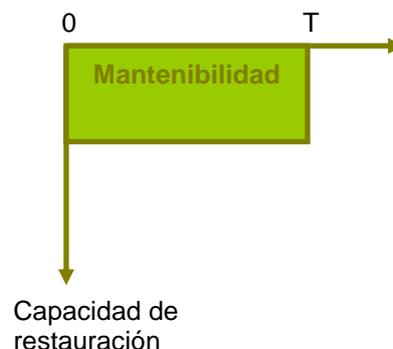


Figura 12. Mantenibilidad de un sistema.

La gráfica anterior representa que la mantenibilidad es inversamente proporcional al área sombreada, por lo que el producto o dispositivo con mantenibilidad más alta (deseable), cubrirá un área más pequeña área y viceversa.

La mantenibilidad puede ser expresada cuantitativamente como la longitud de tiempo T durante el cual el proceso de mantenimiento es desarrollado. La mantenibilidad es la probabilidad de que el dispositivo después de la falla sea puesto en un estado de funcionamiento dado y en un tiempo dado.

1.12 Definición de disponibilidad

Es la probabilidad de que un dispositivo se encuentre funcionando, es decir; que no esté averiado ni en reparación. La figura 13 tomada de Amstadter (1976) muestra la relación entre confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.

La optimización de la disponibilidad es un objetivo clásico del mantenimiento ya que al mejorarla, se incrementa la confiabilidad y disminuyen los tiempos de reparación del sistema, por lo que según O'Connor (1985) la disponibilidad es función de la confiabilidad y de la mantenibilidad de acuerdo a la siguiente relación:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

D: Estimador de la disponibilidad

MTBF: Tiempo promedio de buen funcionamiento durante un periodo dado de la vida del equipo.

MTTR: Tiempo promedio entre reparaciones.

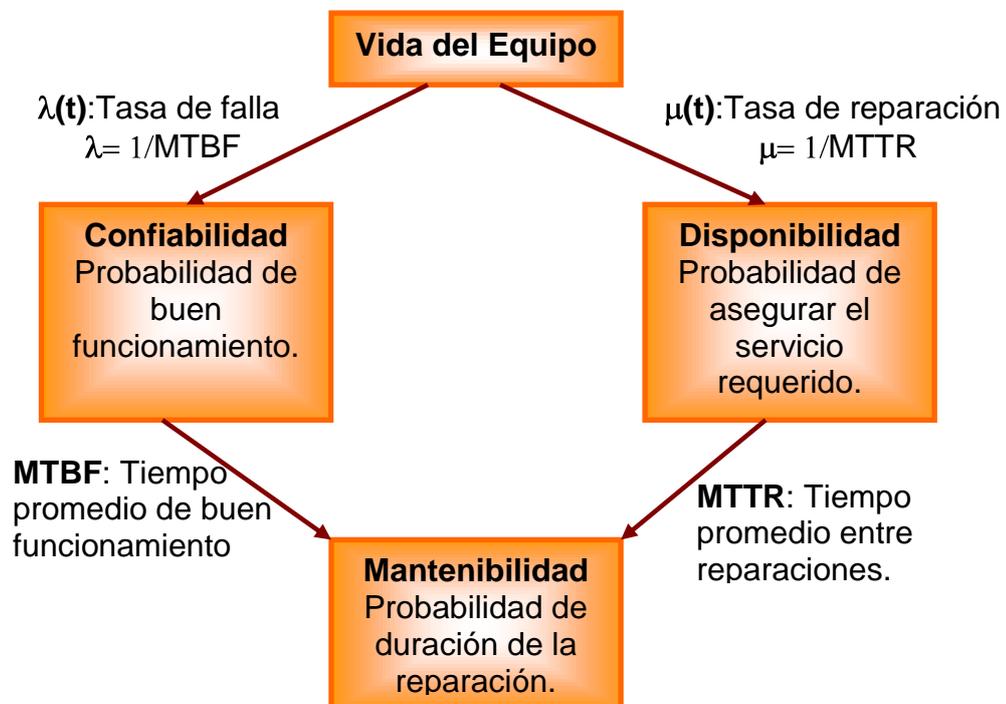


Figura 13. Confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad

La tabla 1 muestra una breve comparación entre los parámetros de confiabilidad y mantenibilidad, definidos anteriormente.

Tabla 1. Comparación entre los parámetros de confiabilidad y mantenibilidad

CONFIABILIDAD	MANTENIBILIDAD
Tiempo medio entre fallas	Tiempo medio para mantener
Tasa de fallas	Tasa de mantenimiento
Probabilidad de falla en un mantenimiento	Tiempo promedio de mantenimiento

Sección II. Antecedentes de probabilidad

1.13 Funciones de probabilidad generalmente usadas en confiabilidad

Una variable aleatoria es una variable cuya ocurrencia depende única y exclusivamente del azar. Cuando una variable aleatoria se representa en forma gráfica, es posible identificar una distribución de probabilidad de esa variable que puede ser empírica o teórica. Las variables empíricas se representan usando distribuciones de frecuencias de datos agrupados, cuya representación indica que no existe ninguna distribución teórica conocida que la represente y debe ser expresada como una distribución de datos en el intervalo de muestreo dado. Las variables discretas sólo pueden tomar los valores extremos de un intervalo y generalmente se asocia a situaciones de conteo. Estas variables se caracterizan por tener función densidad, función acumulada, función complemento, valor esperado del promedio y valor esperado de la varianza. La variable aleatoria continua puede tomar cualquier valor en un intervalo y está representada por el conjunto de los números reales.

Cuando una variable aleatoria se representa en forma gráfica, es posible identificar una distribución de probabilidad de esa variable que puede ser empírica o teórica. Las distribuciones teóricas, corresponden a un modelo teórico previamente determinado.

Acuña (2003) describe que las distribuciones de variable aleatoria discreta más comunes son: binomial, uniforme discreta, Poisson, multinomial e hipergeométrica y que las distribuciones de variable aleatoria continua más comunes son: normal, lognormal, Weibull, beta, uniforme continua, gamma, Erlang-k, triangular y exponencial. De acuerdo con Martínez (2010) en el análisis de la confiabilidad existen varias distribuciones de probabilidad que se usan con frecuencia. A continuación se describen varias de ellas: distribución binomial, Poisson, exponencial, de Rayleigh, Weibull, normal.

1.13.1 Distribución binomial

Esta distribución tiene varias aplicaciones en problemas de confiabilidad de tipo combinatorio. Acuña (2003) señala que esta distribución es útil cuando se relaciona con la probabilidad de salida tal como el número total de fallas en una

secuencia de k ensayos, donde cada ensayo tiene dos posibles resultados (falla o no falla) y la probabilidad de falla es la misma para cada ensayo. La distribución binomial es discreta y toma los valores $0, 1, 2, 3, \dots, k$. Pateiro (2008) define a la función de densidad discreta como:

$$f_i = \binom{k}{i} p^i (1-p)^{k-i}; \quad i = 0, 1, \dots, k$$

Donde el coeficiente binomial está definido:

$$\binom{k}{i} = \frac{k!}{i! (k-i)!}$$

p es la probabilidad de falla para cada ensayo; i es el número de fallas en los k ensayos. La función de distribución acumulativa está dado por:

$$F_j = \sum_{i=0}^j \binom{k}{i} p^i (1-p)^{k-i}$$

1.13.2 Distribución de Poisson

Martínez (2010) señala que esta distribución es utilizada en confiabilidad cuando el interés radica en la ocurrencia de un número de eventos que son del mismo tipo. La ocurrencia de cada evento es denotada por un punto en la escala de tiempo, donde cada evento representa una falla. La función de distribución está definida por:

$$f_m = \frac{\lambda t^m}{m!} e^{-\lambda t}$$

donde λ es la constante de falla (o razón de falla), t es el tiempo y la función de distribución acumulativa es

$$F_k = \sum_{i=0}^k \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!}$$

1.13.3 Distribución de Rayleigh

Esta distribución es usada en trabajos de confiabilidad asociados a problemas en teoría del sonido. Su función de densidad está dada por:

$$f_t = \frac{2}{\theta^2} t e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^2}; \quad f > 0, \quad \theta > 0$$

La función de distribución acumulada está dada por:

$$F_t = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^2}$$

1.13.4 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull, que recibe su nombre del investigador sueco que la desarrolló se caracteriza por considerar la tasa de fallos variable, siendo utilizada por su gran flexibilidad, al poder ajustarse a una gran variedad de funciones de fiabilidad de dispositivos o sistemas.

La distribución de Weibull complementa a la distribución exponencial y a la normal, que son casos particulares de aquella. Martínez (2010) señala que a causa de su mayor complejidad sólo se usa cuando se sabe de antemano que una de ellas es la que mejor describe la distribución de fallas o cuando se han producido muchos fallos (al menos 10) y los tiempos correspondientes no se ajustan a una distribución más simple.

La distribución de Weibull permite estudiar cuál es la distribución de fallas de un componente clave de seguridad que se pretende controlar y que a través del registro de fallas, se observa que éstas varían a lo largo del tiempo y dentro de lo que se considera tiempo normal de uso.

Su función de densidad está dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta}$$

donde b y q son los parámetros de forma y escala, respectivamente. La función de distribución acumulativa es como sigue:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta}$$

La tasa de fallos para esta distribución es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

Las ecuaciones anteriores sólo se aplican para valores de $t - t_0 \geq 0$. Para valores de $t - t_0 < 0$, las funciones de densidad y la tasa de fallos valen 0. Las constantes que aparecen en las expresiones anteriores tienen una interpretación física:

t_0 es el parámetro de posición y define el punto de partida u origen de la distribución.

λ es el parámetro de escala, extensión de la distribución a lo largo del eje de tiempo.

β es el parámetro de forma y representa la pendiente de la recta describiendo el grado de variación de la tasa de falla.

1.13.5 Distribución exponencial

La variable aleatoria exponencial, es el tiempo que transcurre hasta que se da el primer evento de Poisson. Es decir, la distribución exponencial puede modelar el lapso entre dos eventos consecutivos de Poisson que ocurren de manera independiente y a una frecuencia constante. Esta distribución se emplea con bastante frecuencia con objeto de modelar problemas del tipo "tiempo - falla" y como modelo para el estudio de intervalos en problemas de espera; por ejemplo, la duración de componentes electrónicos. Pateiro (2008) señala que la función exponencial tiene especial utilidad para representar tiempos de vida: duración de una pieza hasta que se avería, longevidad de una persona, etc. La distribución exponencial no tiene memoria, es decir, la probabilidad de ocurrencia de eventos presentes o futuros no depende de los que hayan ocurrido en el pasado. De esta forma, la probabilidad de que una unidad falle en un lapso específico depende nada más de la duración de éste y no del tiempo en que la unidad ha estado en operación.

Una variable aleatoria x tiene distribución exponencial de parámetro $\lambda > 0$ si su función de densidad es:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0$$

Donde:

$f(x)$ es la probabilidad de que el elemento proporcione resultados satisfactorios en el momento x .

El parámetro λ representa la tasa de fallas. El lapso promedio de tiempo entre dos eventos independientes de Poisson.

1.13.6 Distribución normal

La distribución normal es la de mayor uso de todas las distribuciones continuas de probabilidad. Pateiro (2008) la considera idónea para modelar una gran diversidad de mediciones de la física, química o biología. Su función de densidad de probabilidad es:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} \quad \text{si } z \in R$$

1.13.7 Distribución gamma

Señala Martínez (2010) que una variable aleatoria sigue una distribución gamma de parámetros α y β (positivos), si su función de densidad es:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x} \quad \text{si } x \geq 0$$

donde:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

y:

$$\Gamma n = n - a !$$

Si $\alpha = 1$ la función gamma deriva en la función exponencial.

1.13.8 Funciones para la caracterización de la confiabilidad

En términos matemáticos, Ruiz-Falcó (2012) señala que la confiabilidad de un determinado dispositivo en el instante x , $R(x)$ viene definida en función de su tasa de falla $\lambda(x)$ mediante la siguiente expresión:

$$R x = e^{-\lambda x}$$

La confiabilidad de un dispositivo en un instante x representa la probabilidad de que dicho dispositivo sobreviva a ese instante, suponiendo que estaba en perfectas condiciones operativas en el instante inicial y que va a estar sometido en el período $(0, t)$ a unas condiciones operativas contempladas en su diseño.

O'Connor (1985) refiere que en la ingeniería de confiabilidad interesa la probabilidad de que un elemento sobreviva durante un intervalo dado, es decir; que no haya ninguna falla en el intervalo $(0 a x)$. Esta probabilidad está dada por la función de confiabilidad $R(x)$. En ésta, se considera el tiempo como una variable independiente y la confiabilidad como una variable dependiente.

Los tiempos de vida de la unidades que fallan, tienen un patrón aleatorio, para modelar los tiempos de vida o tiempos a la falla se utilizan variables aleatorias. Toda la información de una variable aleatoria se encuentra en su distribución. Villa (2009) señala que la materia prima en los estudios de confiabilidad son los tiempos de vida de las unidades estudiadas.

La función de confiabilidad también puede definirse de acuerdo con Palacio (2013) y con Arata (2009) como sigue:

$$R x = 1 - F(x)$$

Donde $F(x)$ es la función de probabilidad acumulativa de x . Es el área bajo la curva de $F(x)$ de 0 a x .

Algunas consideraciones acerca de la función de confiabilidad:

1. Influenciados por la definición de confiabilidad, $R x$ deberá ser una función decreciente con el tiempo.
2. $R x$ no está definida para valores de tiempo negativo y,

En la teoría de confiabilidad, de acuerdo con Arata (2009) se representa a la función de falla $f(x)$ o función de densidad probabilística de falla, que representa la probabilidad de que un elemento falle en un instante x cualquiera. La densidad de probabilidad es la probabilidad de falla por unidad de tiempo. Murray y Lin (2013) indican que cuando se multiplica por la longitud de un

pequeño intervalo de tiempo en el instante x , el cociente es la probabilidad de falla en ese intervalo. La función de probabilidad acumulada de falla $F(x)$ cuantifica la probabilidad que el equipo o sistema falle en el intervalo de tiempo $0, x$. De acuerdo con la figura 14, entre más extenso sea el horizonte temporal, mayor es la probabilidad de falla y por lo tanto, menor es la confiabilidad del sistema. Arata (2009) señala que las funciones de importancia para la caracterización de la confiabilidad son $f(x)$, $F(x)$, $R(x)$ y λ , 2009.

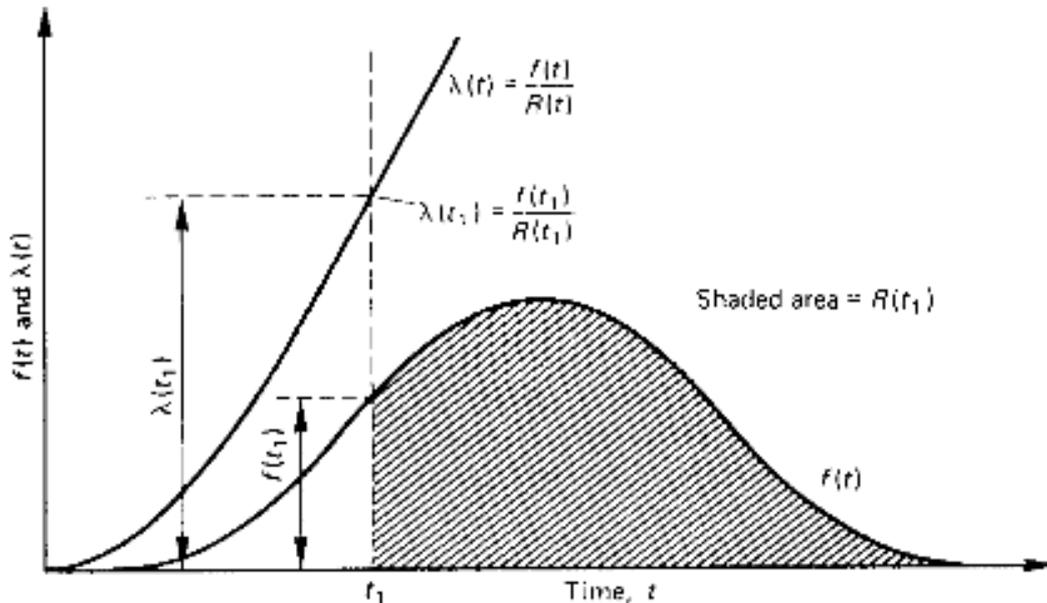


Figura 14. Representación de la función densidad de probabilidad de falla.

1.14 Pruebas de bondad de ajuste

Para determinar que la distribución de frecuencias observadas de un conjunto de datos son compatibles (se ajustan) con alguna de las distribuciones anteriores, se usan las pruebas de bondad de ajuste.

Las pruebas de bondad de ajuste, se usan para determinar si un conjunto de datos se ajustan a alguna de las distribuciones teóricas de probabilidad, comparando las frecuencias observadas F_0 realmente en cada categoría o intervalo de clase, con las frecuencias esperadas teóricamente F_e . Algunas de las pruebas de bondad conocidas son:

- χ^2
- Kolmogorov – Smirnov
- Shapiro – Wilks
- Anderson-Darling
- Cramer-von Mises

1.14.1 Prueba χ^2

Diseñada para variables aleatorias discretas con un número finito de valores, la prueba compara la distribución de frecuencias observada F_0 de una variable, con la distribución de frecuencias de la misma variable medida en un grupo de

referencia. El objetivo final de la prueba es determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre la distribución observada y la distribución esperada F_e .

La prueba χ^2 hace uso de la distribución del mismo nombre para probar la bondad del ajuste al comparar el estadístico de prueba χ_0^2 con el valor en tablas de la mencionada distribución χ^2 con ν grados de libertad y un nivel de significancia α .

En la prueba se plantean las siguientes hipótesis:

Hipótesis estadística nula H_0 :

$$F_0 = F_e$$

Hipótesis estadística alterna H_1 :

$$F_0 \neq F_e$$

A continuación se calcula el factor χ_0^2 y se consultan los datos de valores críticos de χ^2

H_0 se rechaza si el valor calculado de los datos resulta mayor que el valor crítico.

H_0 se acepta si éste valor es igual o menor. En este caso se concluye que la F_0 es semejante a la F_e . Es decir; que ambas distribuciones se ajustan bien o que la distribución evaluada se ajusta a la esperada.

1.14.2 Prueba Kolmogorov – Smirnov

La prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov es una prueba no paramétrica que se utiliza para verificar, con base en una muestra y cierto grado de certidumbre, si se puede sostener la afirmación de que la población se comporta conforme a la distribución planteada. La representación gráfica de la prueba de Kolmogorov – Smirnov tomada de Pérez (2012) se muestra en la figura 15.

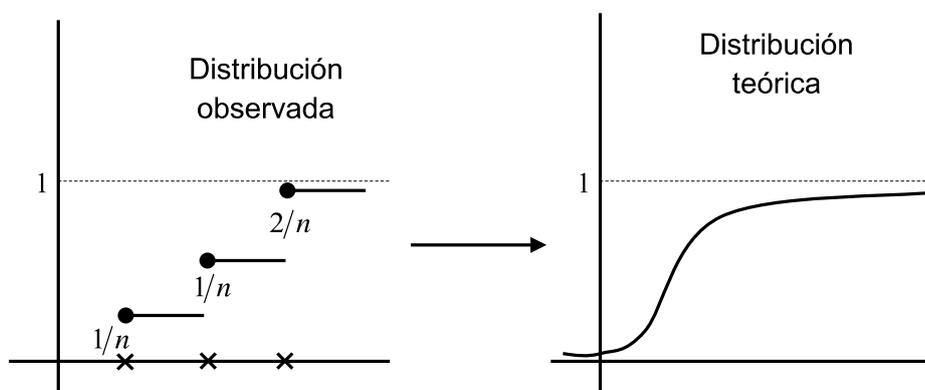


Figura 15. Distribución teórica y empírica para la prueba de Kolmogórov-Smirnov

En la prueba se plantean las siguientes hipótesis:

Hipótesis estadística nula H_0 :

$$F_0 = F_e$$

Hipótesis estadística alterna H_1 :

$$F_0 \neq F_e$$

Se consultan los datos de valores críticos de D_n . Dicho valor será comparado con los valores críticos que se muestran en las tablas de Kolmogorov – Smirnov.

La decisión se toma como sigue: a partir de la probabilidad α de error que se está dispuesto a tolerar en la conclusión, y dependiendo del tamaño de la muestra, se determina el valor c/n (en donde c es una constante y n es el tamaño de la muestra) que marca la frontera entre lo que se considerará grande y lo que se puede considerar pequeño. En caso contrario se concluirá que la distribución sí parece ser la propuesta.

H_0 Se rechaza en el caso en que D_n sea más grande que dicho valor c/n , se deberá concluir que la distribución de la población no parece ser la propuesta, con un nivel de significancia α .

H_0 se acepta si éste valor es igual o menor. En este caso se concluye que la F_0 es semejante a la F_e . Es decir; que ambas distribuciones se ajustan bien o que la distribución evaluada se ajusta a la esperada.

1.14.3 Prueba Shapiro – Wills

Publicada en 1965 por Samuel Shapiro y Martin Wilk, se usa para contrastar la normalidad de un conjunto de datos. Se plantea como H_0 que una muestra x_1, \dots, x_n proviene de una población normalmente distribuida. Se considera uno de los test más potentes para el contraste de normalidad. Usado para muestras pequeñas.

En la prueba se plantea que:

F_0 es la distribución de frecuencias observada de una variable.

F_e es la distribución esperada.

Con las siguientes hipótesis:

Hipótesis estadística nula H_0 :

$$F_0 = F_e$$

Hipótesis estadística alterna H_1 :

$$F_0 \neq F_e$$

El estadístico del test es:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n x_i - x \right)^2}$$

donde:

$x_{(i)}$ es el número que ocupa la i -ésima posición en la muestra;

x es la media muestral;

las constantes a_i dependen del tamaño de muestra y se buscan en las tablas de Shapiro-Wilks.

H_0 supone que la población está distribuida normalmente, si el p-valor es menor a α (nivel de confianza), entonces H_0 es rechazada (se concluye que los datos no vienen de una distribución normal). Si el p-valor es mayor a α , no se rechaza la hipótesis y se concluye que los datos siguen una distribución normal.

1.14.4 Prueba Anderson – Darling

Stephens (1974) señala que la prueba de Anderson-Darling se utiliza para probar si una muestra de datos proceden de una distribución específica. Es una prueba general para comparar el ajuste de una función de distribución acumulada observada con una función de distribución acumulada esperada.

En la prueba se plantea que:

F_0 es la distribución de frecuencias observada de una variable.

F_e es la distribución esperada.

Con las siguientes hipótesis:

Hipótesis estadística nula H_0 :

$$F_0 = F_e$$

Hipótesis estadística alterna H_1 :

$$F_0 \neq F_e$$

A continuación se calcula el estadístico A^2 de prueba, definido como sigue:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) * [\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{n-i+1}))]$$

H_0 se rechaza si el valor calculado de los datos A^2 resulta mayor que el valor crítico obtenido a partir de los valores tabulados para esta prueba. Se concluye que los datos no se ajustan a la distribución propuesta.

1.14.5 Prueba Cramér-von Mises

La prueba original fue desarrollada por Harald Cramer y Richard Von Mises en 1928, y adaptada por Anderson y Darling en 1952 y por Watson en 1961. Se emplea para comparar dos distribuciones empíricas o para comparar una función de distribución acumulada F^* con una función de distribución empírica.

Sean $x_1, x_2 \dots, x_N$ y $y_1, y_2 \dots, y_M$ los valores observados en la primera y segunda muestra respectivamente, en orden creciente. Sean $r_1, r_2 \dots, r_N$ los rangos de x en la muestra combinada, y sean $s_1, s_2 \dots, s_M$ los rangos de y en la muestra combinada. Los estadísticos de prueba calculados como sigue:

$$T = Nw^2 = \frac{U}{NM(N + M)} - \frac{4MN - 1}{6(M + N)}$$

El estadístico U se define como:

$$U = N \sum_{i=1}^N (r_i - i)^2 + M \sum_{j=1}^M (s_j - j)^2$$

Si el valor de T es mayor que los valores tabulados, se puede rechazar la hipótesis de que las dos muestras provienen de la misma distribución, en caso contrario, se aceptan.

Sección III. Teoría de mantenimiento

1.15 Definición y tipos de mantenimiento

Penkova (2007) define al mantenimiento como el trabajo necesario para mantener en buen estado de funcionamiento todo tipo de bienes, consiste en una serie de actividades con cuya ejecución se logra alcanzar un mayor grado de confiabilidad en los equipos.

De acuerdo con Raña (2011) la finalidad del mantenimiento es asegurar la utilización de los equipos con máxima disponibilidad, lograr calidad, buena presentación y correcta operación, contribuir a la seguridad del usuario, del mantenedor y a proteger el medio ambiente, conservar los equipos, contribuir al retorno óptimo del capital invertido. Es decir; son todas las actividades desarrolladas con el fin de conservar instalaciones y equipos en condiciones de funcionamiento seguro, eficiente y económico.

Existen dos formas de mantenimiento, el primero es el correctivo que se refiere a las actividades que se deben llevar a cabo cuando un equipo, instrumento o estructura ha tenido un fallo y el segundo es el mantenimiento preventivo, que se refiere al conjunto de actividades que se llevan a cabo en un equipo, instrumento o estructura, con el propósito de que opere a su máxima eficiencia, evitando que se produzcan fallos forzadas o imprevistos. Su principal objetivo es descubrir y corregir deficiencias que posteriormente puedan ser causa de

daños más graves. Olarte (2010) señala que las grandes industrias, conscientes de las pérdidas que se producen cuando una máquina se descompone e interrumpe su producción, destinan una buena parte de su presupuesto en actividades de mantenimiento preventivo.

Dentro del mantenimiento preventivo, existe otro tipo de mantenimiento, que es el predictivo, éste no depende de la característica de la falla y es el más efectivo cuando el modo de falla es detectable por monitoreo de las condiciones de operación. Este mantenimiento realiza un seguimiento de cada una de las variables relacionadas con el funcionamiento de las máquinas para poder predecir posibles fallas y tomar las acciones correctivas más apropiadas en el momento oportuno.

Existen otros tipos de mantenimiento, tales como:

a) Mantenimiento rutinario: Es el mantenimiento preventivo dentro de un sistema correctivo. En la práctica, no es posible diferenciar totalmente ambos sistemas.

b) Mantenimiento programado: Son las acciones llevadas a cabo a intervalos regulares de tiempo. Este tipo de actividad requiere sacar de funcionamiento el equipo y solo puede ser bien planificada cuando la falla es dependiente del tiempo de operación. Las principales actividades factibles de programar son la lubricación y la limpieza.

c) Operar hasta la falla: Esta estrategia no requiere planes por adelantado, sólo asegurar que al momento de la falla se contará con los recursos para atender la emergencia en el menor tiempo posible. Desde todo punto de vista, esta es la estrategia menos deseable si se empleara como la única por seguir.

d) Mantenimiento de oportunidad: En este tipo, se hace uso de los tiempos de paro de los equipos por otras estrategias empleadas o por paradas en la operación. Se hace uso de tiempos muertos.

1.16 Niveles de mantenimiento

La elección del nivel de mantenimiento debe hacerse a nivel de subconjuntos, incluso de los componentes más sensibles. El conjunto de elecciones utilizadas forma la estructura del plan de mantenimiento. La tabla 2 identifica los cinco niveles de mantenimiento extraídos de la norma francesa AFNORX 60011 y que se pueden leer con más detalle en el portal de internet Ingeniería y mantenimiento (2013).

Tabla 2. Descripción de los niveles de mantenimiento

Niveles de mantenimiento	Descripción
Nivel 1	Ajustes sin desmontaje de equipo, cambio de elementos accesibles.
Nivel 2	Arreglos por cambio de elementos. Operaciones menores de mantenimiento.
Nivel 3	Identificación y diagnóstico de averías, reparación por cambio de componentes funcionales, reparaciones menores.
Nivel 4	Trabajos importantes de mantenimiento correctivo.
Nivel 5	Renovación, reconstrucción.

1.17 Mantenimiento productivo total (TPM)

El enfoque del mantenimiento productivo total tiene influencia en las corrientes de calidad de Juran y Crosby respecto a la orientación hacia la prevención en lugar de la inspección o reparación. García (2011) señala que el TPM pretende aumentar la disponibilidad y eficacia del equipo existente en cualquier situación, que busca la mejora del equipo de producción, mantenerlo en el nivel óptimo de servicio y así reducir su costo de ciclo de vida.

El TPM es un programa que consiste en asignar tiempos para realizar el mantenimiento de equipos de una manera planeada y anticipada con el fin de reducir los tiempos de paros. Se orienta a crear un sistema que previene las pérdidas en todas las operaciones de la empresa. Esto incluye cero accidentes, cero defectos y cero fallas. Tiene como propósito hacer que los equipos operen sin averías y fallas, eliminar toda clase de pérdidas, mejorar la confiabilidad de los equipos y emplear de manera eficiente la capacidad industrial instalada.

Padilla (2006) señala que los procesos fundamentales del TPM son mejoras enfocadas, mantenimiento autónomo, mantenimiento planificado o progresivo, mantenimiento de calidad, prevención de mantenimiento, entrenamiento y desarrollo de habilidades de operación. De particular interés para esta tesis es conocer en qué consisten las mejoras enfocadas, el mantenimiento autónomo y el mantenimiento de calidad.

Las mejoras enfocadas comúnmente conocidas como Kaizen, son actividades que se desarrollan con la intervención de las diferentes áreas comprometidas en el proceso, con el objeto de maximizar la efectividad global del equipo a través de trabajo organizado en equipos multidisciplinarios, empleando metodología específica.

El mantenimiento autónomo está compuesto por un conjunto de actividades que se realizan diariamente por todos los trabajadores en los equipos que operan, incluyendo inspección, lubricación, limpieza, intervenciones menores, cambio de herramientas y piezas, estudiando posibles mejoras, analizando y

solucionando problemas del equipo y acciones que conduzcan a mantener el equipo en las mejores condiciones de funcionamiento.

Mantenimiento de calidad (Hinshitsu Hozen), tiene como propósito establecer las condiciones del equipo en un punto donde el *cero defectos* es factible. Las acciones del mantenimiento de calidad buscan verificar y medir las condiciones *cero defectos* regularmente, con el objeto de facilitar la operación de los equipos en la situación donde no se generen defectos de calidad.

1.18 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

El RCM es uno de los procesos desarrollados durante la década de los 70, fue originalmente definido por los empleados de la United Airlines, Stanley Nowlan y Howard Heap. Dada la elevada tasa de accidentes en aquel tiempo, la industria de la aviación comercial en Estados Unidos, publicó un estudio de patrones de falla en los componentes de aviones cambiando todas las costumbres que hasta el momento se tenían sobre el mantenimiento, mismo que sentó las bases para el desarrollo del RCM. Soto (2012) señala que actualmente el RCM se ha extendido a la industria militar, nuclear, automotriz, eléctrica y petrolera, entre otras.

El RCM es uno de los procesos desarrollados con el objetivo de ayudar a determinar las políticas para mejorar las funciones de los equipos y manejar las consecuencias de sus fallas. De acuerdo con Escalona (2005), en la práctica, la confiabilidad puede apreciarse por el comportamiento que tienen cinco factores que se considera existe en todo recurso por conservar, estos factores son: edad del equipo, medio ambiente donde opera, carga de trabajo, apariencia física y pruebas de funcionamiento. También señala que si el RCM se aplicara para desarrollar un nuevo sistema de mantenimiento preventivo ya existente, puede reducir la cantidad de mantenimiento rutinario habitualmente hasta un 40% a 70%.

El método clasifica las consecuencias de las fallas en cuatro grupos:

Consecuencias no evidentes: aquellas que no tienen impacto directo, pero exponen a la organización a otras fallas con consecuencias serias, a menudo catastróficas.

Consecuencias en la seguridad y el medio ambiente: Son fallas que además de su impacto ambiental, también pueden afectar a los seres humanos.

Consecuencias operacionales: Aquellas que afectan la producción (calidad del producto, servicio al cliente, etc.). Tienen un costo asociado.

Consecuencias no operacionales: Las fallas evidentes que caen dentro de esta categoría no afectan ni a la seguridad ni a la producción, por lo que el único gasto directo es el de la reparación.

El RCM pone tanto énfasis en las consecuencias de las fallas como en las características técnicas de las mismas y lo hace integrando una revisión de las

fallas operacionales con la evaluación de aspectos de seguridad y amenazas al medio ambiente, esto hace que la seguridad y el medio ambiente sean considerados a la hora de tomar decisiones en materia de mantenimiento. Soto (2012) considera que el mantenimiento debe estar enfocado en preservar altos valores de confiabilidad para el cumplimiento de las funciones de los sistemas, equipos o procesos, en lugar de orientarse a preservar equipos, independientemente de la función que cumplen y de su contexto operativo.

1.19 Estructura y objetivos de un plan de mantenimiento

De acuerdo con Alpízar (2008), un plan de mantenimiento tradicional se basa principalmente en la estrategia operar hasta la falla. Enfocado en realizar reparaciones rápidamente, en contar con personal capacitado y en asegurar que se cuenta con repuestos y herramientas necesarios en el momento de la falla. Un enfoque más moderno, indica que el plan de mantenimiento debe ser más integral, consistente en la combinación de varias estrategias y filosofías de calidad. Además de requerir varias etapas en el proceso. Alpízar (2008) señala que en el proceso de desarrollar el plan de mantenimiento, se debe determinar el mejor procedimiento para cada parte, mismos que se deberán juntar para producir el plan de mantenimiento integral o global.

La efectividad de los procedimientos de mantenimiento, normalmente se obtiene al nivel de las “unidades”, ya que la disponibilidad de la unidad afecta directamente la ejecución de una determinada función de un sistema.

Objetivos del plan:

- Mantener el equipo en un estado aceptable de operación.
- Asegurar la disponibilidad del equipo a un nivel determinado.
- Obtener un rendimiento máximo del equipo a corto plazo.
- Garantizar la seguridad máxima a los usuarios.
- Disminuir los costos directos de mantenimiento.

Etapas para llevar a cabo el plan de mantenimiento.

- a) determinar las unidades críticas en el proceso
- b) Determinar la disponibilidad de las unidades
- c) Determinar las partes críticas y su modo de falla
- d) Selección del procedimiento de acuerdo con el modo de falla
- e) Ensamblar el plan para cada unidad
- f) Ensamblar el plan para todo el sistema

1.20 Condiciones necesarias para la implantación de la política de mantenimiento.

Una política de mantenimiento supone dotarse de medios humanos, organizativos y materiales, por tanto implica:

- Voluntad de la dirección.
- Conocimiento de las funciones de mantenimiento, sus posibilidades y sus limitaciones.
- Participación en la definición de los objetivos y dotación de los medios correspondientes.

- Admitir la necesidad de una inversión inicial sin esperar retorno de beneficios inmediatos.
- Estructuras compatibles con la función de mantenimiento
- Dotación en medios humanos.
- Formación del personal.
- Competencia del reclutamiento en gestión de mantenimiento.
- Dotación en medios financieros.
- Presupuesto suficiente frente a los objetivos previstos.
- Posibilidad de inversión.
- Equipo de taller.
- Herramienta estándar adaptada al material, medios científicos de vigilancia.
- Explotación de los datos operacionales en confiabilidad, disponibilidad y costos.

Alpízar (2008), señala que existen tres áreas básicas en la planeación del mantenimiento: largo plazo, corto plazo y planes inmediatos. La etapa a largo plazo cubre la planeación de los requerimientos de mantenimiento y sus metas se deben fijar a cinco o diez años. Aunque el nivel inicial de esta planificación es muy elevado, los efectos de estos planes recaen sobre toda la organización. La planeación a corto plazo, contiene planes que se desarrollan con el horizonte aproximado de un año. Para estos planes se toman en cuenta tres actividades básicas: la instalación de equipo nuevo, el trabajo cíclico y el trabajo de mantenimiento preventivo. Las tres deben estar incluidas en el programa de mantenimiento. La tercer área contiene los planes inmediatos en la actividad del mantenimiento. Ésta incluye una planificación diaria con el propósito de reducir el tiempo utilizado en traslados y otras actividades que no constituyen el trabajo directo sobre los equipos o instalaciones.

Capítulo 2. Metodología

El orden y la simplificación son los primeros pasos hacia el dominio de un tema, el enemigo real es lo desconocido.

Thomas Mann

La metodología seguida en este trabajo, se describe a continuación en la figura 16 y posteriormente a lo largo del capítulo se desarrollan en orden secuencial cada uno de los pasos realizados.

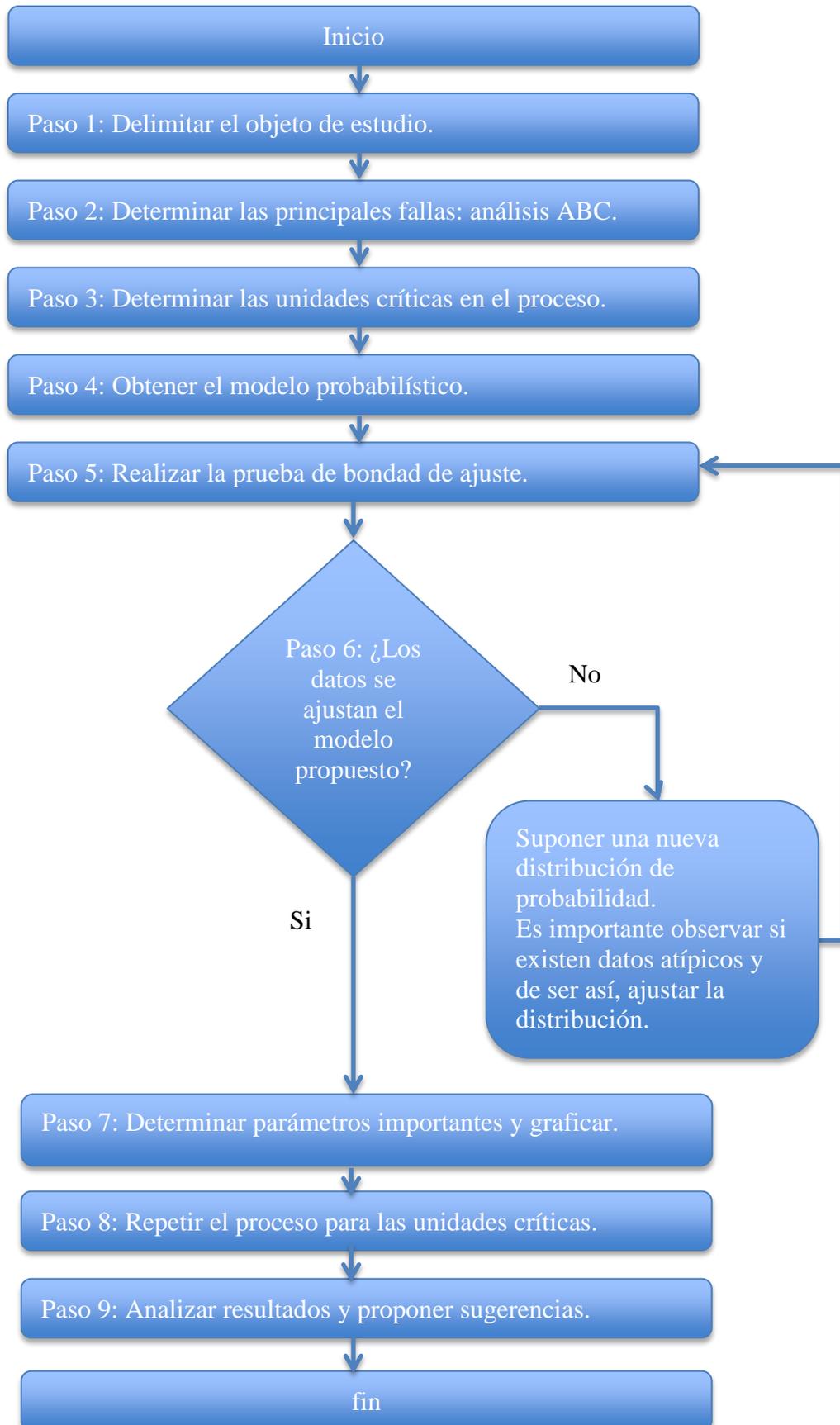


Figura 16. Diagrama sobre la metodología para realizar el análisis de confiabilidad

2.1 Delimitar el objeto de estudio

El objeto de estudio para este trabajo es el tren ligero, por tratarse de un sistema muy amplio, el análisis de confiabilidad podría enfocarse en evaluar la confiabilidad del servicio y la confiabilidad de funcionamiento del mismo. El análisis de ambos aspectos permitirá mejoras sustanciales al servicio integral que presta la empresa. Sin embargo, en afán de limitar el objeto de estudio, éste trabajo se enfocará únicamente en evaluar la confiabilidad de funcionamiento del tren ligero, es decir; en identificar los componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos, neumáticos, etc., que presentan un mayor número de fallas, así como aquellos trenes críticos (unidades) con alta incidencia de falla.

2.2 Determinar las principales fallas: análisis ABC

Para realizar el análisis ABC se recurrirá a la búsqueda de información sobre las fallas registradas en las bitácoras de mantenimiento del tren ligero. El análisis se realiza para un periodo de cuatro años de operación. Es importante señalar que será necesario ordenar y clasificar la descripción de las fallas, ya que por tratarse de datos que tradicionalmente no han recibido un trato estadístico, son registrados de manera no formal y no estricta o rigurosa. Es común observar en estos datos que a una falla referida al mismo componente, se le pueden dar diferentes nombres o registrarse de manera incompleta, a juicio del operador y/o del maestro mecánico que realiza la reparación, es decir; una misma falla puede recibir varios nombres diferentes.

Una vez hecha la clasificación y correcciones necesarias a los datos obtenidos, se contarán numéricamente todas las fallas que ocurrieron para todos los trenes que estuvieron en operación durante cada año de estudio para posteriormente poder jerarquizarlas.

Para este trabajo, se usará un enfoque ABC con el objetivo de jerarquizar las fallas considerando el número de veces que se han presentado durante un periodo de tiempo. Únicamente se considerará el criterio de frecuencia en este análisis, por ser éste el único dato con el que se cuenta en las bitácoras de mantenimiento. Si la gerencia de administración de mantenimiento contara con información sobre costos de cada una de estas fallas, se podría realizar el análisis ABC incorporando el criterio de costo y podría ser de bastante utilidad para tener un espectro más amplio y mejor informado en la toma de decisiones.

En principio, las fallas se jerarquizarán en tres grupos:

- A:** Fallas con una frecuencia alta de ocurrencia
- B:** Fallas con una frecuencia media de ocurrencia
- C:** Fallas con una frecuencia baja de ocurrencia

En general, las curvas ABC muestran que el grupo A significa alrededor del 20% de los datos jerarquizados y el 80% del uso del dinero, éste criterio se usa principalmente cuando el análisis se aplica a la teoría de inventarios.

El procedimiento para realizar el análisis ABC es el siguiente:

Paso a: Se ordenan las fallas de acuerdo al número de veces que se presentaron en total en orden descendente durante los 4 años de los cuales se tienen datos.

Paso b: Se calcula la frecuencia relativa (f_r) de cada tipo de falla.

$$f_r = \frac{\text{Número de veces que ha ocurrido la falla}}{\text{Número total de fallas}}$$

Paso c: Se calcula la frecuencia acumulada (F_r) de cada tipo de falla comenzando al principio de la lista y acumulando las actividades hacia abajo.

Paso d: Se grafica la curva de la frecuencia acumulada. Cabe destacar que no existe una convención en cuanto a qué datos entran en la clasificación A, B y C. Esto se hace casi siempre observando la curva y sus *dobleces*. Sipper (1998) señala que en general, el grupo A llega hasta donde comienza a doblar la curva, el B hasta el final de este doblez y el C incluye el resto de los datos. Un ejemplo de una curva ABC típica se muestra en la figura 11 en el capítulo pasado.

2.3 Determinar las unidades críticas en el proceso

Si bien ahora ya se contará con una jerarquización de fallas durante el tiempo de análisis, aún faltan datos importantes por conocer; el primero de ellos es determinar cuáles son las unidades críticas de todo el sistema. Es fundamental poder identificar aquellos trenes que presentan un mayor índice de fallas de todo el parque vehicular, dado que en función de esta información se podrá programar la operación y funcionamiento de los trenes, así como brindar atención especializada a cada uno de ellos.

Para identificar las unidades críticas, se recurrirá una vez más a las bitácoras de mantenimiento de cada uno de los trenes. De una manera simple, se observa que hay bitácoras con una mayor cantidad de reportes que otros.

Para identificar a las unidades críticas se seguirá el siguiente procedimiento: Cabe aclarar que únicamente se cuenta con datos del registro de fallas de cada uno de los trenes para tres años.

Paso a: Conteo simple de cada una de las fallas de cada bitácora para cada tren.

Paso b: Registrar número de fallas por tren.

Paso c: Ordenar cada tren de acuerdo al número de ocurrencia de sus fallas de manera descendente.

Paso d: Graficar el número de fallas ordenado por tren.

Una vez realizados los análisis anteriores, se ha logrado obtener la siguiente información:

- Las principales fallas del tren ligero
- Los trenes con mayor frecuencia de fallas

El paso siguiente es estimar el modelo probabilístico para obtener parámetros importantes como la tasa de fallas y el tiempo medio de buen funcionamiento del parque vehicular del tren ligero.

Es importante destacar que el análisis se realizará de manera individual sólo para las primeras unidades críticas detectadas en el apartado anterior.

2.4 Obtener el modelo de comportamiento probabilístico

Las bitácoras de mantenimiento son los instrumentos que contienen los datos referentes a la descripción de la falla y su correspondiente fecha de ocurrencia para cada uno de los trenes que se analicen. Para este caso, se realizará el análisis para el tren determinado como el más crítico y se realizará el ejercicio para los siguientes tres trenes, esta información se colocará en el anexo 1.

Para obtener un modelo matemático para la función de probabilidad de falla, se considerará el funcionamiento de un determinado elemento en el medio para él especificado. Se define a la variable aleatoria (x) como el tiempo durante el cual el elemento funciona satisfactoriamente antes de que se produzca una falla. Se determina entonces el tiempo de ocurrencia de fallas, éste se obtiene de la resta de la fecha de ocurrencia de cada falla de su anterior subsecuente. Dado el registro de los datos, la primer estimación del tiempo se obtiene en días; sin embargo, para hacer un mejor tratamiento de los datos, se realizará la conversión de días a horas.

Posteriormente se ordenará la variable aleatoria x de manera ascendente y se supondrá que la tasa de fallas se comporta como una distribución de probabilidad dada. Para el objeto de estudio, se supondrá que los datos se comportan como una distribución exponencial, Walpole (1999) argumenta que las distribuciones exponencial y gamma juegan un papel importante en teoría de colas y problemas de confiabilidad y que los tiempos de falla de partes componentes y sistemas eléctricos, a menudo quedan bien modelados mediante la distribución exponencial. Además en el contexto de la confiabilidad, los tiempos de vida son cantidades inherentemente positivas.

La distribución exponencial se aplica en confiabilidad cuando la probabilidad de falla durante algún periodo de tiempo en el futuro es independiente de la edad. Un componente y objeto que sigue una distribución de vida exponencial tiene la particularidad de “*no recordar*” cuanto tiempo ha estado operando, es decir; existe la misma probabilidad de que el sistema falle independientemente del tiempo que lleve operando. A esto se le conoce como propiedad de falta de memoria.

2.5 Realizar la prueba de bondad de ajuste

En la construcción del modelo de comportamiento probabilístico, es importante determinar si un conjunto de datos se ajusta apropiadamente a una distribución específica de probabilidad, en este caso, se deberá determinar si los modelos de tiempos de fallas de cada una de las unidades críticas se ajustan a la distribución de probabilidad exponencial.

Ante la disyuntiva de cuál prueba de bondad de ajuste se usará, es conveniente saber que Taylor (2011) señala que “la prueba de bondad de ajuste no paramétrico más popular, es la prueba de Kolmogorov-Smirnov” Cualquiera de las pruebas anteriores podría usarse para este trabajo, excepto la prueba de Shapiro-Wilk que Rincón (2011) señala, es usada para contrastar la normalidad de un conjunto de datos, sobre todo para muestras pequeñas ($n < 30$). Marques Dos Santos señala que la prueba χ^2 se emplea tanto para distribuciones continuas como para discretas, mientras que la de Kolmogorov – Smirnov y la de Anderson-Darling se emplean sólo para distribuciones continuas. Algunos autores señalan que “la prueba Kolmogorov – Smirnov es más poderosa que la prueba χ^2 , es decir; cuando se rechaza la hipótesis nula, se tiene una mayor confiabilidad en dicho resultado” (Pérez, 2012, p.65). Wang (2009) señala en un estudio comparativo entre ambas pruebas, que en todos los casos estudiados, la prueba de Kolmogorov – Smirnov siempre presentó un error tipo I más pequeño que la prueba χ^2 y que la potencia de la prueba χ^2 es menor que la prueba de Kolmogorov – Smirnov excepto cuando la distribución en la hipótesis nula tiene una media determinada (independientemente de la dispersión de la distribución). Finalmente, Wang concluye que la prueba de Kolmogorov – Smirnov es más válida que la prueba χ^2 en general, cuando se apuntó a un nivel de significación de 0,05. Para este trabajo, la prueba que se usará será la de Kolmogorov – Smirnov, que puede aplicarse para valores agrupados en intervalos de clase, comúnmente usada en los análisis de confiabilidad.

Una explicación más detallada de las pruebas de bondad señaladas, se encuentra en el capítulo anterior de este trabajo. A continuación se describe la metodología para realizar la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov – Smirnov, que es la usada en este trabajo.

2.5.1 Metodología para realizar la prueba de Kolmogorov-Smirnov²

El fundamento teórico de esta prueba se encuentra en el capítulo anterior, a continuación se describe la metodología usada para realizar esta prueba.

- a) Comparar el comportamiento acumulativo que presentan los datos observados, con el que se esperaría que tuvieran si la distribución fuera la que se está suponiendo.
- b) Después de determinar la magnitud de las diferencias entre lo observado y lo esperado se decide si dichas diferencias se pueden considerar grandes o no.

² Aguilar, Patricia. Apuntes de clase.

Desarrollo de la prueba:

- 1) Se deben ordenar en forma creciente todos los datos en la muestra, de manera que cada uno aparezca solamente una vez en la lista:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_r,$$

- 2) Agregar una columna (frecuencia) en la que se indique cuántas veces aparece cada dato.
- 3) Calcular $S_n x$, la frecuencia acumulada relativa de ese dato, es decir; la proporción de los datos en la muestra que son menores o iguales al dato x . Esto es:

$$S_n x_r = \frac{Sf_i}{n}$$

- 4) Utilizar la distribución supuesta para calcular el valor de la función de distribución para cada uno de los valores x_i $F_0 x_i$. Este valor de la función de distribución es exactamente la frecuencia acumulada relativa esperada de cada valor x_i si la distribución verdadera fuera la supuesta.
- 5) Comparar las frecuencias mediante el cálculo de la diferencia; sin embargo, sólo es importante conocer la magnitud de la diferencia, no el sentido de ella, por lo cual se calcula el valor absoluto de la misma.

$$|S_n x_r - F_0 x_r|$$

- 6) Dado que en general la diferencia será distinta para cada x_r , el valor que se utilizará para realizar la prueba, el cual se conoce como estadístico de prueba, será la diferencia máxima:

$$D_n = \max |S_n x_r - F_0 x_r|$$

- 7) Dicho valor D_n será comparado con los valores críticos que se muestran en las tablas de Kolmogorov – Smirnov.
- 8) La decisión se toma como sigue: a partir de la probabilidad α de error (tipo I) que se está dispuesto a tolerar en la conclusión, y dependiendo del tamaño de la muestra, se determina el valor c/n (en donde c es una constante y n es el tamaño de la muestra) que marca la frontera entre lo que se considerará grande y lo que se puede considerar pequeño. En el caso en que D_n sea más grande que dicho valor c/n , se deberá concluir que la distribución de la población no parece ser la propuesta, con un nivel de significancia α . En caso contrario se concluirá que la distribución sí parece ser la propuesta.

2.6 Evaluar los resultados de la prueba de bondad de ajuste

En caso de que se encuentren datos atípicos en la muestra, es necesario realizar una revisión de los mismos y realizar un ajuste si se observa que pueden estar contaminados. Señala Álvarez (2009) que en el contexto del análisis de datos, sigue siendo interesante poder detectar y eliminar los puntos/datos que pueden provenir de una contaminación, que hacen que una muestra no se ajuste a una distribución de referencia. En el mismo sentido, Perea (1999) señala que existe la posibilidad de que entre los datos que se someten a un análisis, haya algunos que sean fruto de la contaminación, puntuaciones atípicas o puntuaciones que se alejan del resto de los datos, habitualmente producidas por factores externos a los procesos de interés, tales como distracciones de los participantes o fallos en el instrumental, también señala que la existencia de tales puntuaciones atípicas, añadirán variabilidad espuria a las estimaciones.

Osborne (2004) indica que hay un fuerte efecto benéfico de la eliminación de datos atípicos; la precisión tiende a aumentar de manera significativa y sustancialmente, y los errores de inferencia tienden a disminuir. También refiere que los valores atípicos pueden surgir de diversos mecanismos o causas diferentes; los valores extremos son a menudo causados por errores humanos, tales como errores en la recolección o entrada de datos, errores intencionales con el objetivo de sabotear la investigación, errores inherentes al muestreo, (es posible que unos pocos miembros de una muestra inadvertidamente fueron extraídas de una población diferente que el resto de la muestra).

Osborne (2004) señala que conceptualmente, hay fuertes argumentos para la eliminación o alteración de los valores extremos. Indica que en la mayoría de los casos, los errores de inferencia se redujeron significativamente, un argumento principal para la detección y eliminación de valores atípicos. Álvarez (2009), refiere que se supone a priori que los datos erróneos aparecerán en las colas de la distribución y se elimina una cierta proporción de ellos en cada cola. También concluye que “la forma tradicional de robustificar una media se basa en eliminar la misma proporción de datos en las dos colas de la distribución. Perea (2009) señala que otra justificación para tales procedimientos de recorte, se basa en que las observaciones atípicas no son meramente observaciones alejadas del grueso de datos, sino que son puntuaciones provenientes de una distribución que no es la de interés.

Señala Díaz (2009) que la presencia de datos extremos origina largas colas en sus distribuciones, lo cual da como resultado muy poca sensibilidad en las pruebas y que una forma de aumentar la sensibilidad sin perder validez, consiste en aplicar la inferencia a las medias recortadas, esto es, suprimir o recortar un porcentaje α de los datos extremos en cada tratamiento o muestra. También señala que la metodología de eliminar datos extremos ha sido utilizada durante más de dos siglos, pero sólo a finales del siglo pasado fue sometida a escrutinio científico. “Se encontró que era robusta tanto a la validez como a la sensibilidad de las inferencias, en presencia de distribuciones de colas largas”. (Tukey y McLaughlin 1963, citado por Díaz 2009).

2.7 Determinar parámetros importantes y graficar

Una vez que se ha determinado si la distribución de probabilidad de la tasa de fallas se ajusta a la exponencial, se obtienen los parámetros importantes y las distribuciones de probabilidad acumulada y de confiabilidad.

- a) La función de densidad de probabilidad:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0$$

- b) La función de distribución acumulada:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$$

- c) La función de confiabilidad:

$$R(x) = e^{-\lambda x}$$

- d) Tasa de fallas λ representa la tasa de fallas:

- e) MTBF (tiempo de buen funcionamiento) que es igual al recíproco de la tasa de fallas:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

- f) Gráfica de la función de probabilidad:

La curva de supervivencia se obtiene si se grafican los valores de $f(x)$ en ordenadas y los valores correspondientes de x en abscisas.

La fórmula anterior proporciona la probabilidad de supervivencia del dispositivo para cualquier intervalo de tiempo comprendido dentro del ámbito de la vida útil del mismo, o sea desde el momento 0 al momento x . Se supone que el dispositivo ha superado las misiones precedentes y que no se encuentra al final de su vida útil durante el curso de la misión considerada.

2.8 Repetir el proceso para otras unidades críticas

Tal como se realizó para la primer unidad crítica, a continuación se realizará el mismo procedimiento para las demás unidades críticas de todo el sistema. obtenidas como se describió en el apartado 2.3 de este capítulo.

Es fundamental haber identificado aquellos trenes que presentaron un mayor índice de fallas de todo el parque vehicular, así como los parámetros importantes como las funciones de densidad de probabilidad, de distribución acumulada y de confiabilidad, así como el tiempo medio de buen funcionamiento, puesto que en función de esta información se podrá programar la operación y mantenimiento de los trenes, así como brindar atención especializada a cada uno de ellos. Es importante destacar que el análisis se

realizará de manera individual sólo para las primeras unidades críticas detectadas en el apartado anterior.

2.9 Analizar resultados y proponer sugerencias

La evaluación y análisis de los indicadores sobre equipos y fallas, sirve de apoyo en el proceso de toma de decisiones sobre el comportamiento de las partes respecto a sus características de confiabilidad.

Es importante analizar la tasa de falla de los equipos para poder establecer un buen programa de mantenimiento preventivo y predictivo que permita mantenerlos en buenas condiciones de operación y que permita renovarlos antes de que su tasa de fallos sea inaceptable.

Capítulo 3: Estudio de caso

“...si eso que me están contando sirve para fabricar cosas que funcionen, entonces la fiabilidad no es otra cosa que la ingeniería en su manera más práctica”.

James R. Schlesinger

3.1 Descripción del objeto de estudio: el tren ligero

El tren ligero es un modo de transporte que presta su servicio sobre la calzada de Tlalpan, un importante corredor del sur de la ciudad de México. Atiende a a usuarios de las demarcaciones de Coyoacán, Tlalpan, Xochimilco y pueblos aledaños, la línea está conformada por 16 estaciones de paso y 2 terminales: Tasqueña y Xochimilco.

Con algunas excepciones, la longitud de los andenes de las estaciones es de 60 metros y cuentan con torniquetes electrónicos de entrada y torniquetes mecánicos de salida.

Para el funcionamiento del tren ligero, además de las instalaciones fijas como son vías, estaciones y línea elevada, se requiere de otro elemento que es el suministro oportuno de energía eléctrica y su adecuada distribución a todo lo largo de la línea. En lo que respecta a las instalaciones fijas, el tren ligero cuenta con 26.8 km de vía instalada, asimismo cuenta con 28.8 km de catenaria instalada. La vía del tren ligero es semiconfinada ya que en su derrotero existen actualmente 11 cruceros vehiculares.

La energía eléctrica utilizada por el servicio del tren ligero es suministrada por la compañía de luz y fuerza del centro a través de acometidas de 23 kV de corriente alterna, a las subestaciones de rectificación que tienen como función reducir la tensión de 23 kV y rectificarla a 750 VCD. Esta energía eléctrica, es aplicada a la línea elevada de donde es tomada por los trenes por medio de un dispositivo llamado pantógrafo.

La ubicación de las subestaciones rectificadoras a lo largo de la línea del tren, están conectadas en paralelo y cuentan con un dispositivo (disyuntor principal), el cual se dispara al detectar un corto circuito o una sobrecarga en la línea, protegiendo de esta forma a las instalaciones fijas y al equipo de los trenes. La energía eléctrica transformada y rectificada es transportada por medio de cables alimentadores a la línea elevada³ por medio del pantógrafo de donde los trenes la toman. La tabla 3 describe las condiciones de operación del tren ligero.

³ Llamada comúnmente “catenaria” debido a la forma que adopta. Tradicionalmente se le llama así a la forma que toma una cuerda de densidad uniforme sujeta por sus dos extremos y sometida únicamente a la fuerza de la gravedad. Ivorra (2013).

Tabla 3. Descripción de las condiciones de operación del tren ligero

Condiciones de operación del tren ligero ⁴	
Servicio continuo 20 horas diarias los 365 días del año	
Frecuencia de paso entre trenes	240 segundos promedio
Frecuencia de paso entre trenes	360 segundos promedio (en hora valle)
Frecuencia de paso en eventos	120-180 segundos promedio (en operativos especiales)
Número de periodos de horas pico	2 (con intervalo de cuatro horas aproximadamente)
Velocidad máxima de diseño	80 km/h
Carga máxima por eje	20 000 kg
Número de cruceros	11
Peso total de la unidad en vacío:	42 000 kg
Número de unidades circulando en hora pico.	14 a 15 unidades
Número de unidades circulando en hora valle:.	12 unidades
16 estaciones, 2 terminales	
Servicio con doce trenes modelo TE-90 marca concarril siemens y cuatro modelo TE-95 marca bombardier siemens.	
Un taller de mantenimiento en el depósito de Huipulco.	
Una fosa de mantenimiento con grúa tipo bandera de capacidad de carga de 10 ton y una batería de gatos con capacidad de 60 ton.	
Un sistema de barreras automáticas en el cruce de Tlalpan	
Sistema de peaje con boleto magnético en dos terminales y 16 estaciones	

3.2 Encuestas de evaluación del servicio de tren ligero

El departamento de evaluación y atención al usuario del servicio de transportes eléctricos, realiza encuestas a usuarios del tren ligero, con la finalidad de tener un sondeo permanente sobre la percepción que tiene el público usuario de los tres modos de transporte. Dos personas del mismo departamento de evaluación y atención al usuario, realizaron 200 encuestas a los usuarios del tren ligero, divididas en 18 estaciones. Señala la misma encuesta que los cuestionarios fueron diseñados de acuerdo a los reportes más frecuentes que hace el público usuario. La fecha de realización de la encuesta fue del 6 al 10 de septiembre de 2011. Las preguntas realizadas fueron:

1. Rango de edad de los usuarios

- 12 a 19
- 20 a 35
- 36 a 50
- 51 a 60
- 60 ó más

⁴ Parámetros establecidos por el fabricante.

-
- 2. Género**
Femenino
Masculino

 - 3. Ocupación**
Estudiante
Obrero
Empleado
Hogar
Otro

 - 4. ¿El horario cubre sus necesidades?**
Si
No

 - 5. ¿Cuál es su forma de pago?**
Boleto
Alcancía
Cortesía

 - 6. Tiempo de espera para abordar el tren**
0-5 min
5-10 min
11-15 min
16 ó más

 - 7. ¿El tren lo lleva a su destino?**
Si
No

 - 8. ¿Cómo considera la accesibilidad en las estaciones?**
Buena
Mala

 - 9. Los trenes regularmente se encuentran:**
Limpios
Sucios

 - 10. ¿Se siente más seguro en el tren ligero que en otro modo de transporte?**
Si
No

 - 11. ¿El operador conduce con precaución?**
Si
No

12. Cuando intenta abordar el tren, regularmente se encuentra:

Semi-vacío

Lleno

Imposible abordarlo

3.2.1 Resultados de la encuesta

El 48% de los usuarios del tren ligero tiene de 20 a 35 años, el 29% de 36 a 50 años y un 23% son personas de 12 a 19 años y mayores de 51 años. La mayor parte de ellos son empleados, obreros y estudiantes. El 61% de los usuarios son del género masculino y el 29% género femenino.

De manera general, en la figura 17 se muestran dos gráficas producto de la encuesta de evaluación aplicada, mismas que reflejan algunos de los principales problemas del sistema, referidos a la accesibilidad al mismo. El 44% de los usuarios señala que al abordar el tren, éste se encuentra lleno y el 39% señala que le ha sido imposible abordarlo, esto permite hacer varias suposiciones; puede hacer falta que se incremente el parque vehicular, o bien; que se debe mejorar e incrementar la disponibilidad de los trenes. Por otro lado, apenas un 5% de los encuestados señala que el tren no lo ha llevado a su destino, esto podría deberse también a múltiples factores; una posible causa es que el tren falle, deba ser retirado de la operación y no pueda continuar su recorrido. Si bien estas encuestas no reflejan la evaluación del funcionamiento del equipo, y tampoco se cuenta con más información para pasar de las suposiciones a las afirmaciones, sí brindan un panorama general sobre la percepción que tienen los usuarios sobre la calidad del servicio.

Cabe señalar que para la realización de este trabajo, no se contó con más información sobre el diseño y aplicación de la encuesta. Los resultados se muestran completos en el apéndice 2 de este trabajo.

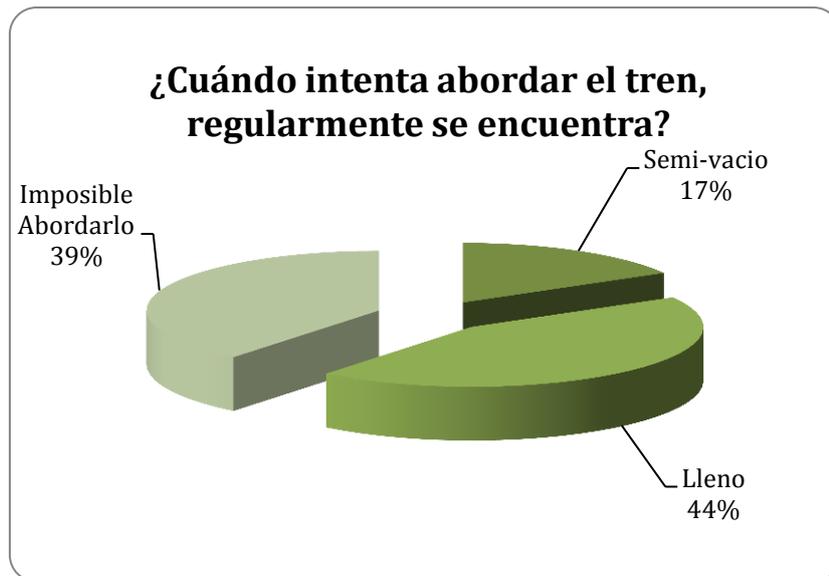


Figura 17. Gráficas producto de las encuestas de calidad del servicio

3.3 Descripción del parque vehicular del tren ligero

El parque vehicular analizado está integrado por 16 trenes, 12 unidades modelo TE-90 y 4 modelo TE-95, con una capacidad máxima de 390 personas (50 sentados y 340 de pie), con objeto de satisfacer la demanda de este modo de transporte, el programa de expedición diario analizado contempla 15 unidades en circulación durante las horas de máxima afluencia matutina y 12 trenes en los periodos del día considerados como “horas valle”.

Las 12 unidades modelo TE-90 fueron fabricadas en 1990 y los 4 trenes TE-95 en 1995. En la tabla 4 se describen los sistemas, subsistemas y componentes que forman parte del tren ligero. Esta clasificación es importante, ya que es así como se encuentran descritos los manuales de mantenimiento, las descripciones de funcionamiento y las fichas técnicas de cada componente.

Tabla 4. Descripción de los sistemas, subsistemas y componentes del tren ligero

	Sistema	Subsistema	Componentes		
Tren ligero	Electrónico	Equipo frenado de	Equipo sobretecho		
			Convertidor estático de auxiliares		
			Caja de aparatos		
			Convertidor estático de tracción		
			Motor de tracción		
			Bajo bastidor		
			Resistencia de frenado		
		Control servicios auxiliares y	Cabinas		
			Articulación		
			Cofres		
			Cofres VEF		
			Equipo salón de pasajeros		
			Sistema neumático	Conexión primaria	Separador de aceite
					Secador de aceite
	Tanques				
	Conexión secundaria	Acoplamiento			
		Claxon			
		Unidad de frenado			
		Cilindro de freno			
		Pantógrafos			
	Puertas				
	Suspensión secundaria				
	Sistema mecánico	Suspensión primaria			
		Boggies	Bastidor		
			Ruedas		
			Accionamiento		
			Accesorios varios		
Articulación		Portillo de articulación			
		Unión de rotación			
Sistema de carrocería	Cristales				
	Carrocería interior				
	Carrocería exterior				
	Estructural				
	Articulación				
Vía e instalaciones eléctricas	Vía balastada y concretada				
	Línea elevada tipo tranvía				
	Línea elevada tipo francesa				

3.4 Determinación de las fallas principales del tren ligero

De acuerdo con las bitácoras de operación del tren ligero para cuatro años diferentes, a continuación se presentan las fallas presentadas en los trenes, así como el total de ellas por cada año.

El personal a cargo de la gestión de mantenimiento realiza el registro de las fallas por cada tren, con base en un reporte que levanta el operador del mismo, o bien; que se genera de manera automática a través del Sistema de Ayuda a la Explotación (SAE) y que cumple funciones como verificar el despacho de los trenes, supervisar maniobras de una vía a otra, regular el intervalo de paso entre convoyes y coordinar la atención de fallas y accidentes.

La tabla 5 muestra las principales fallas del tren ligero presentadas durante cuatro años de análisis, una tabla completa desagregada por año, se muestra en el anexo 1 de este trabajo. La figura 18 muestra una gráfica de éstas fallas y su proporción porcentual. De ésta, puede notarse que el sistema de puertas, el sistema de frenado y los carros bloqueados, representan cada una el 11 y 10% de las fallas totales del tren ligero.

Tabla 5. Fallas del tren ligero	
Descripción de la falla	Total
Sistema de puertas	249
Carros bloqueados	229
Sistema de frenado	225
Motocompresor	199
Sistema de tracción	166
Fanales principales	109
Tubería de equilibrio	106
Electrónica de mandos	105
Fusible principal	104
Cerradura de puerta	89
Velocímetro	76
Torreta	75
Limpiaparabrisas	75
Claxon	73
Bloque de señalización	55
Bandera de destino	55
Asiento de operador	54
Motriz inactiva	44
Pantógrafo	38
Ventilación de equipo	37
Paratren desprendido	37
Ventanilla de cabina	25
Manipulador	24
Convertidor	16
Carrocería	15
Elastómero desprendido	14
Sistema de suspensión	11
Filtración de agua	11

Fallas del tren ligero

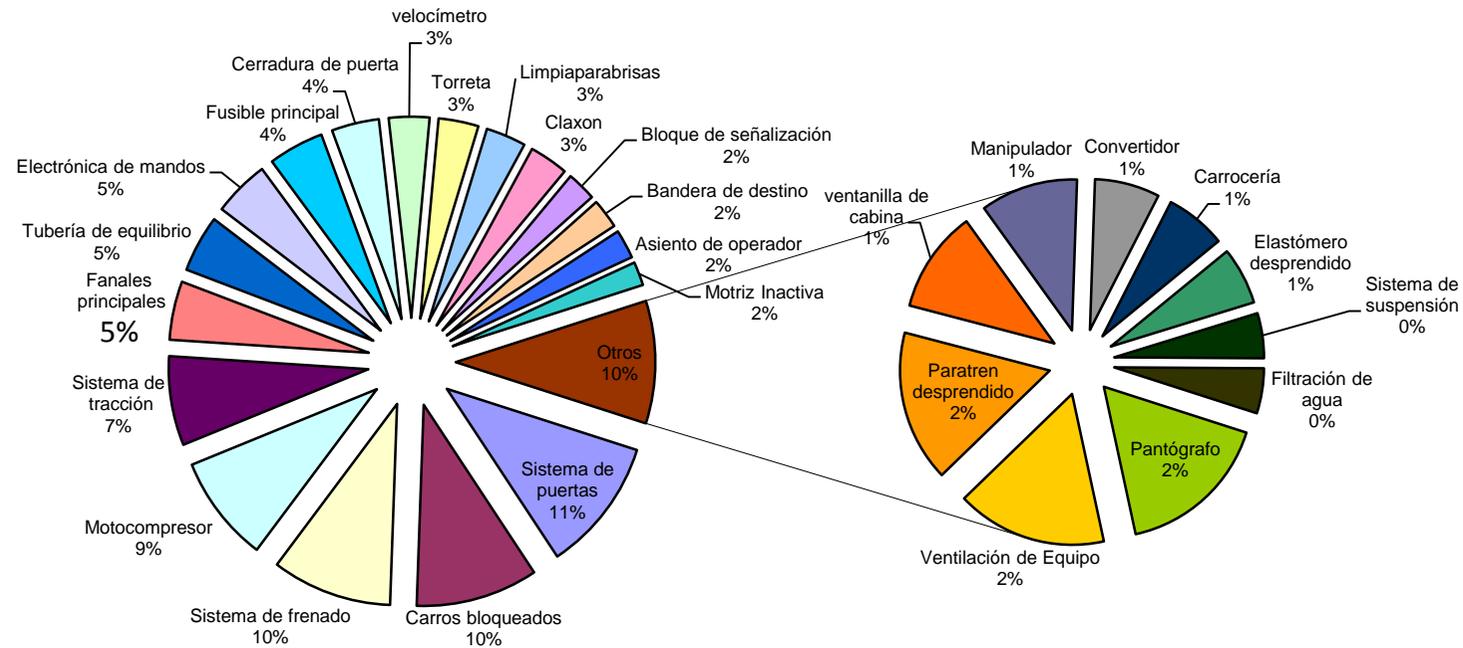


Figura 18. Fallas del tren ligero y su distribución porcentual

3.5 Análisis ABC de las fallas del tren ligero

La curva ABC permite determinar el orden de prioridad de acciones de mantenimiento. El criterio usado para determinar el análisis es el número de fallas.

Para este trabajo, se usará un enfoque ABC con el objetivo de jerarquizar las fallas considerando el número de veces que se han presentado durante un periodo de tiempo. Únicamente se considerará el criterio de frecuencia en este análisis, por ser éste el único dato con el que se cuenta en las bitácoras de mantenimiento. La información resumida sobre la frecuencia y jerarquización de fallas se muestra en la tabla 6, mientras que una representación gráfica de la curva ABC, se muestra en la figura 19.

Tabla 6. Clasificación ABC de las fallas del tren ligero

Descripción de la Falla	Frecuencia acumulada	Tipo
Sistema de puertas	0.107512953	A
Carros bloqueados	0.206390328	A
Sistema de frenado	0.303540587	A
Motocompresor	0.389464594	A
Sistema de tracción	0.461139896	A
Fanales principales	0.5082038	B
Tubería de equilibrio	0.553972366	B
Electrónica de mandos	0.599309154	B
Fusible principal	0.644214162	B
Cerradura de puerta	0.682642487	B
velocímetro	0.715457686	B
Torreta	0.747841105	B
Limpiaparabrisas	0.780224525	B
Claxon	0.811744387	C
Bloque de señalización	0.835492228	C
Bandera de destino	0.859240069	C
Asiento de operador	0.882556131	C
Motriz Inactiva	0.901554404	C
Pantógrafo	0.917962003	C
Ventilación de Equipo	0.933937824	C
Paratren desprendido	0.949913644	C
ventanilla de cabina	0.960708117	C
Manipulador	0.971070812	C
Convertidor	0.977979275	C
Carrocería	0.984455959	C
Elastómero desprendido	0.990500864	C
Sistema de suspensión	0.995250432	C
Filtración de agua	1	C

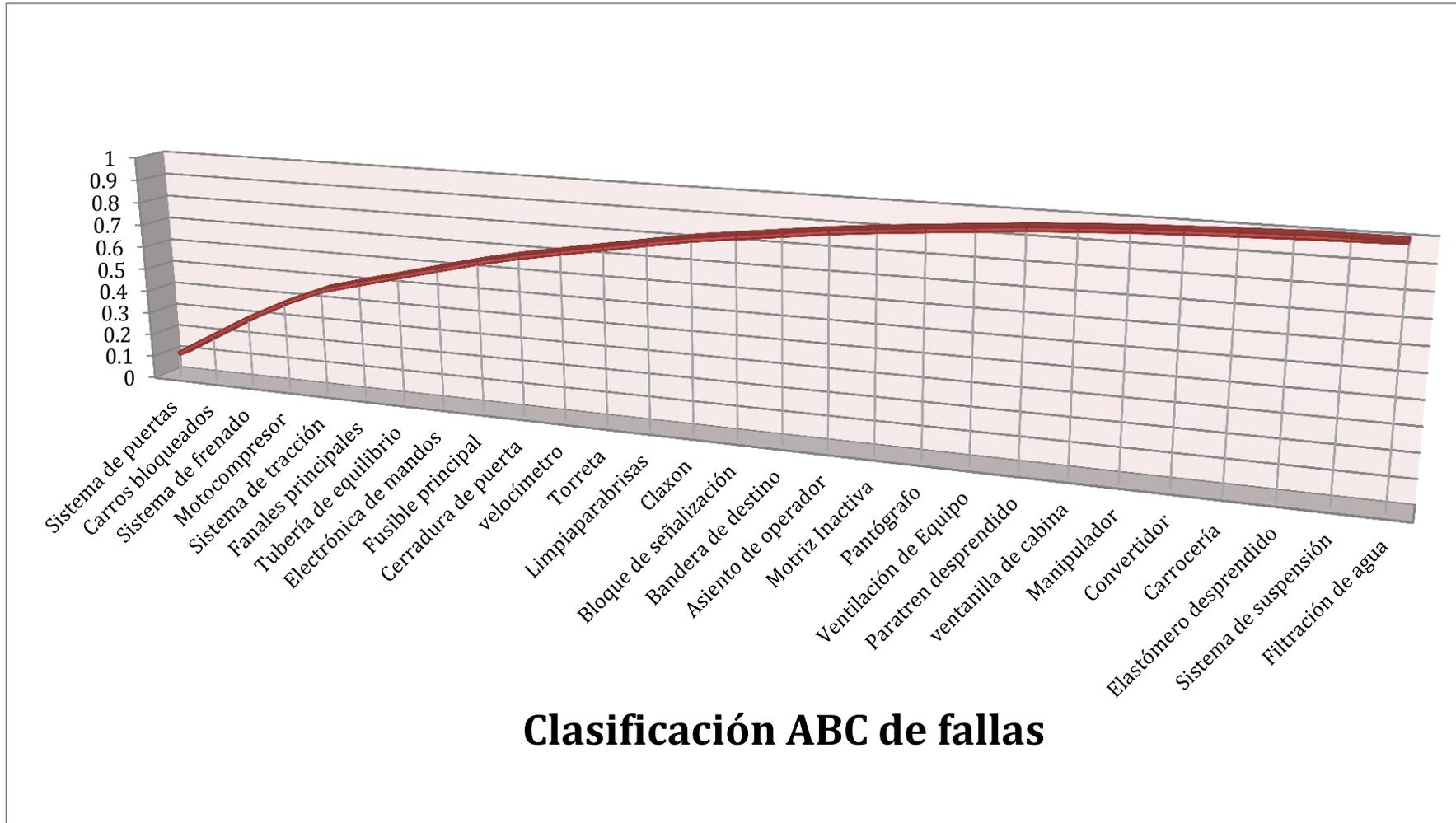


Figura 19. Clasificación ABC de fallas.

La clasificación ABC mostrada en la tabla y figura anteriores, se realizó con base en la frecuencia de las fallas más comunes registradas por los trenes del servicio del tren ligero. Así, se caracterizaron a las fallas tipo A como las que representan el 46% de frecuencia, a las tipo B las que alcanzan el 78% y las C las restantes.

Para cuestiones de mantenimiento será útil considerar y analizar las fallas tipo A, dada su frecuencia y posible repercusión en la calidad del servicio, las fallas más frecuentes son las conocidas como: sistema de puertas, carros bloqueados, ambas relacionados con el sistema neumático de los trenes.

Es importante destacar que la falla relacionada con el motocompresor haya resultado clasificada como tipo A dentro del análisis ya que de manera empírica, los operadores de mantenimiento la señalan como una de las más importantes en el sistema, dada su frecuencia y costo de reparación.

3.6 Determinación de las unidades críticas: trenes con mayor índice de fallas

Una vez que se identificaron las principales fallas en general, también es importante analizar el comportamiento de los trenes para identificar aquellos que presentan un mayor número de fallas.

Para analizar las bitácoras correspondientes a cada tren, únicamente se cuenta con datos para tres años. Dado lo anterior, se analizaron las bitácoras de mantenimiento por tren y se realizó el conteo de cada una de ellas, estos datos se muestran en la tabla 7. Al final, se realiza una gráfica sobre este dato, mostrada en la figura 20.

Se determinó como unidades más críticas a los trenes 26 y 32, dado que han presentado más de 200 fallas, los trenes 27 y 31 les siguen en orden de criticidad.

Tabla 7. Trenes ordenados en función del número total de fallas

Tren No.	Número de fallas			Total
	Año 1	Año 2	Año 3	
26	93	89	62	244
32	97	78	44	219
27	56	103	36	195
31	38	90	60	188
19	58	87	36	181
17	50	87	38	175
25	43	74	57	174
23	48	99	25	172
20	52	73	39	164
18	53	78	30	161
24	37	82	34	153
21	39	71	35	145
22	42	71	25	138
30	31	70	28	129
28	0	73	46	119
29	0	57	43	100

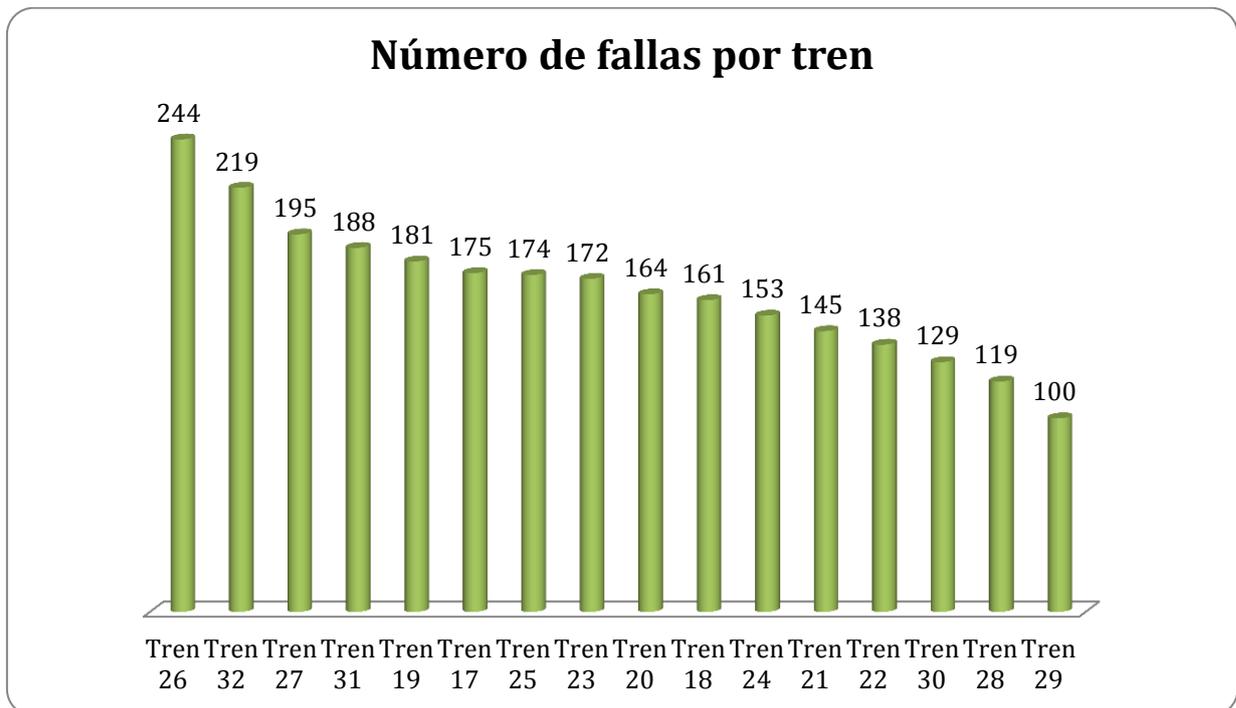


Figura 20. Trenes críticos detectados en función de su número de fallas

3.7 Determinación del modelo probabilístico para el tren 26

El análisis del modelo probabilístico se realizará para el tren 26, por tratarse del que tiene un mayor índice de falla. De la bitácora de mantenimiento, se obtienen los datos referentes a la descripción de la falla y su correspondiente fecha de ocurrencia. Para este caso, se realizará el análisis para el tren determinado como el más crítico y se realizará el ejercicio para los siguientes tres trenes 32, 27 y 31, esta información se desarrolla en el anexo 1.

En la tabla 8 se muestran las fallas del tren 26 a lo largo de un año, posteriormente se indica la fecha de ocurrencia de cada falla y se define al parámetro x como el tiempo de ocurrencia de fallas.

Se define la variable aleatoria (x) como el tiempo durante el cual el tren funciona satisfactoriamente antes de que se produzca una falla. Se determina entonces el tiempo de ocurrencia de fallas, éste se obtiene de la resta de la fecha de ocurrencia de cada falla de su anterior subsecuente. Dado el registro de los datos, la primera estimación del tiempo se obtiene en días; sin embargo, para hacer un mejor tratamiento de los datos, se realizará la conversión de días a horas, posteriormente los datos son ordenados de manera ascendente, en el extracto de la tabla 8 se muestra la descripción de la falla y el tiempo de ocurrencia (x). La tabla completa se muestra en el anexo 2 de este trabajo.

Extracto de la tabla 8. Determinación del tiempo de ocurrencia de fallas para el tren No. 26

Número de falla	Descripción de la falla	Tiempo de ocurrencia de fallas (x)	
		Días	Horas
Falla 1	Motocompresor	28.25	678.08
Falla 2	Torreta	21.46	514.97
Falla 3	Ventilación de equipo	10.85	260.28
Falla 4	Ventilación de equipo	23.90	573.53
Falla 5	Carro bloqueado	3.16	75.83
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
Falla 84	Electrónica de mandos	0.01	0.32
Falla 85	Bandera de destino	2.07	49.58
Falla 86	Bandera de destino	1.37	32.95
Falla 87	Sistema de frenado	5.25	125.97
Falla 88	Sistema de frenado	2.01	48.28

Suponiendo que la tasa de fallas se comporta como una distribución de probabilidad exponencial donde la variable aleatoria x tiene distribución con parámetro $\lambda > 0$ y su función de densidad es:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0$$

$f(x)$ es la probabilidad de que el elemento proporcione resultados satisfactorios en el momento x y el parámetro λ representa la tasa de fallas.

En la construcción del modelo de comportamiento probabilístico, es importante determinar si un conjunto de datos se ajusta apropiadamente a una distribución específica de probabilidad. En este caso, a continuación se determina si el modelo de tiempos de fallas del tren 26 se ajusta a la distribución de probabilidad exponencial.

Para ello, se realiza la prueba de bondad de ajuste de Kolmorov – Smirnov, esta prueba se usará para verificar si se puede sostener la afirmación de que los tiempos de fallas se comportan conforme a la distribución exponencial.

La primera columna muestra los valores de x_r únicamente con una fracción decimal, por eso se le llama a esa columna, x_r modificados, siguiendo la metodología establecida en el capítulo pasado, se obtienen los datos mostrados en el extracto de la tabla 9. La tabla completa se muestra en el anexo 3 de este trabajo.

Extracto de la tabla 9. Prueba de bondad de ajuste tren 26							
x_r modificado	Cuenta de x_r modificado	Total	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada relativa	Frecuencia acumulada esperada	Valor absoluto de la diferencia
0.3	x_r modificado						
1.3	0.3	1	1	1	0.0114	0.0040	0.0074
6.2	1.3	1	1	2	0.0227	0.0161	0.0066
6.3	6.2	1	1	3	0.0341	0.0746	0.0405
8.3	6.3	1	1	4	0.0500	0.0759	0.0259
10.1	8.3	1	1	5	0.0625	0.0982	0.0357
10.5	10.1	1	1	6	0.0750	0.1182	0.0432
10.8	10.5	1	1	7	0.0875	0.1230	0.0355
.
.
.
260.3	230.5	1	1	80	1.0000	0.9439	0.0561
288.4	260.3	1	1	81	1.0125	0.9614	0.0511
451.9	288.4	1	1	82	1.0250	0.9728	0.0522
515	451.9	1	1	83	1.0375	0.9965	0.0410
573.5	515	1	1	84	0.9545	0.9984	0.0439
677.1	573.5	1	1	85	0.9659	0.9992	0.0333
781.6	677.1	1	1	86	0.9773	0.9998	0.0225
911	781.6	1	1	87	0.9886	0.9999	0.0113

De este primer análisis, se desprenden los siguientes parámetros importantes:

Estadístico de prueba $D_n = 0.20925875$

Valor crítico $c/n = 0.18223954$

Dado que $D_n > c/n$

H_0 se rechaza; luego entonces la población no parece ser la propuesta.

Ahora se realizará un segundo análisis suponiendo que la distribución de probabilidad se ajusta a una distribución gamma, este análisis arrojó los siguientes resultados:

Estadístico de prueba $D_n = 0.4743$

Valor crítico $c/n = 0.18223954$

Dado que $D_n > c/n$

H_0 se rechaza; luego entonces la población no parece ser la propuesta.

Esta muestra tampoco se ajusta a la distribución de probabilidad propuesta. Con base en la observación de los datos, existe la posibilidad de que entre éstos, haya algunas puntuaciones atípicas que pudieron existir debido a errores en la captura de la información en las bitácoras de mantenimiento, o bien; pudieron haber sido capturados por una persona ajena a los operadores de mantenimiento. Tal como se señala en la metodología descrita en el apartado 2.5 de esta tesis, una forma de aumentar la sensibilidad sin perder validez, consiste en suprimir o recortar un porcentaje α de los datos extremos en cada tratamiento o muestra, para este caso, se omitirá el 10% de los valores extremos que podrían interferir con respecto a la identificación de la distribución de probabilidad correspondiente, estos datos se muestran resaltados en el extracto de la tabla 9, la nueva prueba de bondad se realizará considerando el comportamiento y la observación de los datos, mostrados a continuación en el extracto de la tabla 10. La tabla completa se muestra en el anexo 4 de este trabajo.

Extracto de la tabla 10. Prueba de bondad de ajuste a datos modificados					
Xr ordenados	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada relativa $S_n(X_r)$	Frecuencia acumulada esperada	Valor absoluto de la diferencia de frecuencias
8.27	1	1	0.01	0.10	0.08
10.07	1	2	0.03	0.12	0.09
10.50	1	3	0.04	0.12	0.08
10.80	1	4	0.05	0.13	0.08
10.87	1	5	0.06	0.13	0.06
11.62	1	6	0.08	0.13	0.06
11.90	1	7	0.09	0.14	0.05
13.30	1	8	0.10	0.15	0.05
14.03	1	9	0.11	0.16	0.05
17.38	1	10	0.13	0.19	0.07
.
.
.
141.53	1	71	0.89	0.83	0.06
163.42	1	72	0.90	0.87	0.03
165.92	1	73	0.91	0.87	0.04
168.78	1	74	0.93	0.88	0.05
196.53	1	75	0.94	0.91	0.03
230.48	1	76	0.95	0.94	0.01
260.28	1	77	0.96	0.96	0.00
288.38	1	78	0.98	0.97	0.00
451.87	1	79	0.99	1.00	0.01
514.97	1	80	1.00	1.00	0.00

De este segundo análisis se desprenden los siguientes parámetros importantes:

Estadístico de prueba $D_n = 0.162614$

Valor crítico $c/n = 0.18223954$

Dado que $D_n < c/n$

H_0 se acepta; luego entonces la población sí parece ser la propuesta, la distribución exponencial.

3.8 Determinación e interpretación de parámetros importantes para el tren 26

Una vez que se ha determinado que la distribución de probabilidad de la tasa de fallas se ajusta a la exponencial, se obtienen los parámetros importantes y las distribuciones de probabilidad acumulada y de confiabilidad.

g) La función de densidad de probabilidad para el tren 26:

$$f(x) = 0.01237e^{-0.01237x}, \quad x \geq 0$$

h) La función de distribución acumulada:

$$F(x) = 1 - e^{-0.01237x}$$

i) La función de confiabilidad

$$R(x) = e^{-0.01237x}$$

j) Tasa de fallas λ representa la tasa de fallas:

$$\lambda = 0.01237$$

k) MTBF (tiempo de buen funcionamiento) que es igual al recíproco de la tasa de fallas:

$$MTBF = 80.8407$$

l) Gráfica de la función de probabilidad

Si se grafica esta función con los valores de $f(x)$ en ordenadas y los valores correspondientes de x en abscisas, se obtiene la "curva de supervivencia" mostrada en la figura 21. Mientras que en la figura 22 se muestra la gráfica de la función de distribución acumulada, que es la integral de la función de densidad y representa la probabilidad de falla antes del tiempo t . Finalmente en la figura 23 se muestra la gráfica de la función de confiabilidad que representa la probabilidad de no presentar falla en el tiempo t .

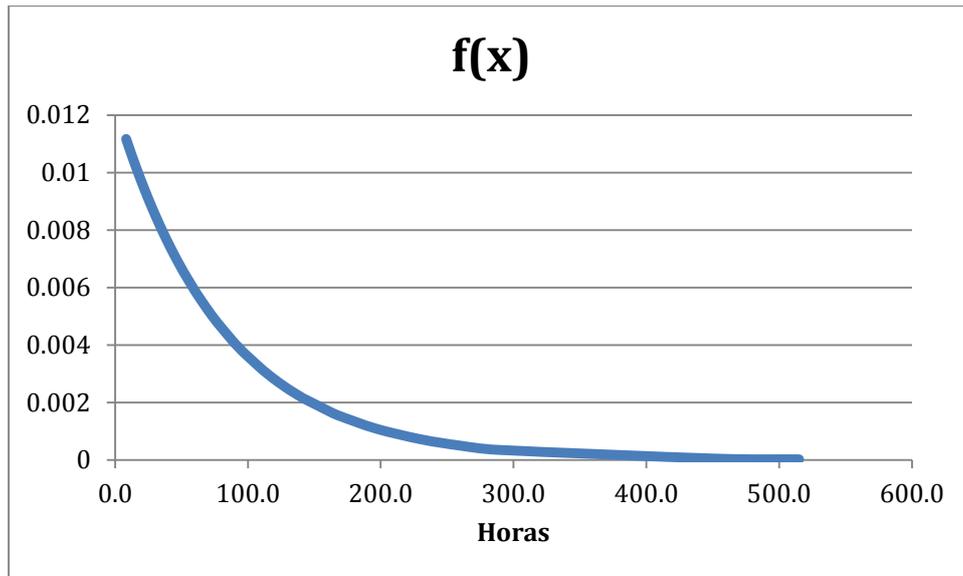


Figura 21. Gráfica de la función de densidad, indica la probabilidad de falla en un determinado tiempo.

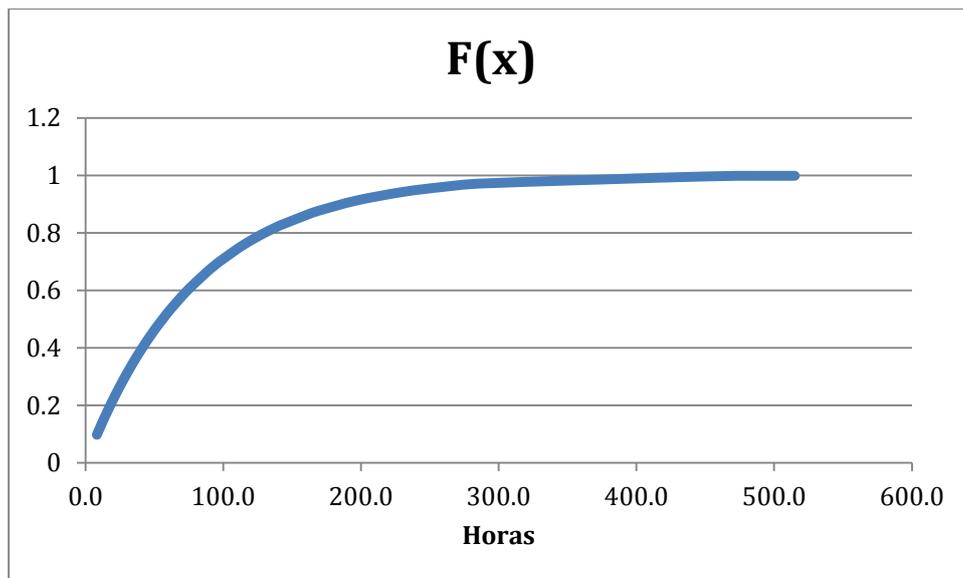


Figura 22. Gráfica de la función de distribución acumulada

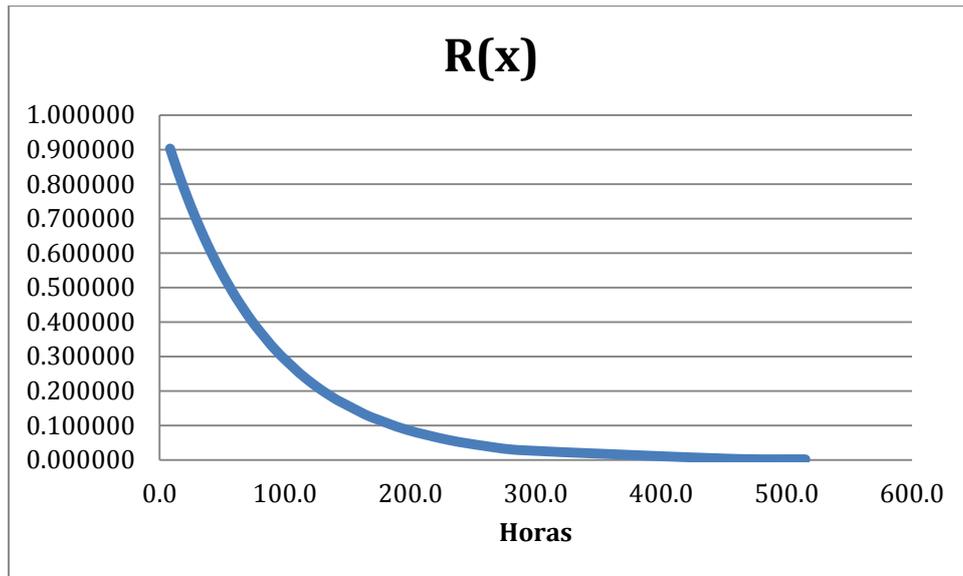


Figura 23. Gráfica de la función de confiabilidad

En conclusión, el comportamiento de los trenes con mayor índice de falla se resume en la tabla 11. De igual forma el ejercicio también se realiza para el tren 32, el siguiente en orden de criticidad. En el anexo 4 se puede observar la gráfica de las distribución de probabilidad de los tiempos de falla al suponer que se trata de una función de probabilidad exponencial.

Tabla 11. Resumen de los parámetros obtenidos para las unidades críticas

Resumen de los parámetros para las unidades críticas No. 26 y 32, el ejercicio también se aplicó a los trenes 27 y 31				
Parámetro	Tren 26	Tren 32	Tren 27	Tren 31
$f x$	$0.01237e^{-0.01237x}$	$0.01418e^{-0.01418x}$	$0.00657e^{-0.00657x}$	$0.00462e^{-0.00462x}$
$F x$	$1 - e^{-0.01237x}$	$1 - e^{-0.01418x}$	$1 - e^{-0.00657x}$	$1 - e^{-0.00462x}$
$R x$	$e^{-0.01237x}$	$e^{-0.01418x}$	$e^{-0.00657x}$	$e^{-0.00462x}$
λ	0.01237	0.01418	0.00657	0.00462
MTBF	80.8407	70.5155	152.1000	216.1889

3.9. Análisis de resultados y propuestas

De acuerdo con la clasificación ABC de fallas, se pudieron jerarquizar las principales fallas del tren ligero. Las tipo A corresponden al sistema de puertas, carros bloqueados, sistema de frenado, motocompresor y sistema de tracción, éstas se relacionan sobre todo con el sistema neumático del tren. Para este caso en particular, se sugiere el RCM como una herramienta para analizar el comportamiento de las fallas mayores, es decir; aquellas que impliquen interrupciones en el servicio y por ende, tengan consecuencias en la calidad del mismo y representen un alto costo para el servicio de transportes eléctricos.

El sistema neumático del tren ligero es parte de vital importancia en el sistema de seguridad, ya que de él depende el óptimo funcionamiento de:

- a) frenado neumático
- b) freno de estacionamiento
- c) Suspensión secundaria
- d) Puertas de acceso

Por diseño, los trenes están formados por dos cajas que se encuentran unidas en sus extremos por una articulación, cada carro cuenta con una cabina de conducción, en estos carros se encuentran ubicados los diversos equipos que conforman el sistema neumático.

Dado lo anterior, se propone calendarizar las acciones de mantenimiento correctivo para el sistema neumático de las unidades críticas detectadas; trenes 26 y 32 en función de la disponibilidad de los mismos y dando prioridad a las principales fallas detectadas en éste sistema (puertas, bloqueo y motocompresor).

El RCM también puede aplicarse a las fallas tipo B, de acuerdo con la clasificación ABC realizada, éstas comprenden averías relacionadas en su mayoría con el sistema electrónico del tren.

La filosofía del mantenimiento productivo total se puede convertir en un buen ejercicio para comenzar a aplicarse a una empresa descentralizada de carácter público. Suárez (2011) señala que las organizaciones de hoy, incluyendo las multinacionales, están más ávidas de encontrar principios rectores (incluyendo al Kaizen) desde una visión más integral y holística, que tan solo "recetas o metodologías preestablecidas.

El TPM puede aplicarse primero como una filosofía general en el proceso de atención y de manera más específica para atender las fallas tipo C, éstas se caracterizan por ser en su mayoría fallas menores, mismas que podrían ser atendidas mediante un adecuado plan de mantenimiento preventivo en un nivel 1 y 2. Las fallas principales por atender dentro de esta clasificación, son en su mayoría relacionadas con accesorios del tren: claxon, bloque de señalización, bandera de destino, asiento de operador, ventanilla de cabina, carrocería, etc.

Por otro lado, al conocer el modelo de la función de densidad de cada uno de los trenes, será posible conocer la probabilidad de falla en un determinado

tiempo, al conocer el modelo de la función de distribución acumulada, será posible determinar la probabilidad de falla de cada tren antes del tiempo t . Y finalmente, una vez obtenido el modelo de la función de confiabilidad, será posible determinar la probabilidad de que los trenes no presenten fallas para un tiempo t .

Un área de mejora importante es la referente a la captura de información de los reportes de mantenimiento que conforman las bitácoras. Ésta podría realizarse a través de las siguientes acciones:

*Contar con formatos estándar con campos obligatorios de captura, o bien; proporcionar módulos de captura a través de computadoras para que todo el proceso se realice de manera digital.

*Estandarizar el proceso de captura de información de las bitácoras de mantenimiento a través del diseño de un nuevo procedimiento.

*Capacitación a los operadores.

Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo, se usaron dos herramientas de la teoría de confiabilidad que sirvieron para identificar las principales fallas de funcionamiento del parque vehicular del tren ligero presentadas durante cuatro años de análisis.

Las herramientas de confiabilidad usadas fueron el análisis ABC y el análisis probabilístico. El primero sirvió fundamentalmente para detectar las principales fallas en general, así como las unidades críticas del sistema, es decir; los trenes con mayor número de fallas durante el tiempo de estudio.

La clasificación ABC sirvió para caracterizar a las fallas tipo A como las que representan el 46% de frecuencia, a las tipo B aquellas que alcanzan el 78% y C a las restantes.

Para cuestiones de mantenimiento, será útil considerar a las fallas tipo A, dada su frecuencia y posible repercusión en la calidad del servicio, las fallas más frecuentes son las conocidas como: sistema de puertas, carros bloqueados, ambas relacionadas con el sistema neumático de los trenes.

También resulta valioso destacar que se identificaron a los trenes críticos, es decir; aquellos con mayor índice de fallas son los trenes número 26 y 32.

La siguiente herramienta de confiabilidad usada fue el análisis probabilístico, que sirvió para determinar parámetros importantes; tales como la tasa de fallas, el tiempo medio entre fallas y las funciones de densidad de probabilidad, de probabilidad acumulada y de confiabilidad de cada uno de los trenes críticos. Una vez conocidos estos datos, resumidos en la tabla 11, los responsables del mantenimiento del tren ligero, contarán con elementos y parámetros importantes para planear las actividades correctivas o preventivas de cada uno de los trenes identificados y realizar los mismos análisis para los trenes restantes.

Las mejoras al mantenimiento del tren ligero deberán tener un enfoque mas integral, consistente en la combinación de varias estrategias y filosofías de calidad, como el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) y/o el mantenimiento productivo total (TPM), ambos descritos en el capítulo 1.

En el proceso de desarrollo del plan de mantenimiento, se deberá determinar el mejor procedimiento para cada parte, poniendo especial énfasis en el sistema neumático. Los procedimientos elaborados para cada parte, se deberán organizar para generar el plan de mantenimiento de cada unidad, esto es; de cada tren, dado que cada uno tiene un MTBF y una tasa de fallas diferente, sin olvidar que los recursos deberán concentrarse en las partes críticas.

Referencias bibliográficas

Acuña, J. (2003). *Ingeniería de confiabilidad*. Costa Rica: Cártago.

Ang, A. & Tang, W. (2007). *Probability concepts in engineering*. (2 ed). New York: Wiley.

Amstadter, B. (1976). *Matemáticas de la fiabilidad. Fundamentos, prácticas y procedimientos*. España: Reverté.

Billinton, R. & Allan, R. (1983). *Reliability evaluation of engineering systems: Concepts and techniques*. (2 ed.). New York: Planum Press.

Chase, R. (2005). *Administración de la producción y operaciones*. (10 ed.). México: Mc Graw Hill.

Fernández, J. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. (2 ed.). Madrid: Fundación Confemental.

Kalbfleish, J. & Prentice, R. (2002). *The statistical analysis of failure time data*. (2ed.). Canada: Wiley.

Kapur, K. & Lamberson, L. (1977). *Reliability in engineering design*. New York: Wiley.

Knezevic, J. (1993). *Reliability, maintainability and supportability. A probabilistic approach*. New York: Mc Graw Hill.

Mendenhall, W., Scheaffer, R. & Wackerly, D. (1986). *Estadística matemática con aplicaciones*. México: Grupo editorial Iberoamérica.

Monchi, F. (1990). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial*. Barcelona: Masson.

Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. (2 ed.). Londres: Butterworth.

O'Connor, P. (1989). *Practical reliability engineering*. New York: Wiley.

Sipper, D. et. al. (1998). *Planeación y control de la producción*. México: Mc. Graw Hill.

Referencias electrónicas

Alpízar, E. (2008). *Operación, mantenimiento y control de calidad*. México: GTZ. Citado el 8 de abril de 2013, de www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual4/cap5.pdf

Álvarez, E. (2009). *Aplicaciones de los recortes imparciales en la comparación de distribuciones* . Tesis doctoral. Universidad de Valladolid. Citado el 20 de abril de 2013, de uvadoc.uva.es/bitstream/10324/106/1/TEISIS33-091211.pdf

Anderson-Darling test. (2004). Citado el 18 de abril de 2013, de http://www.mathwave.com/articles/goodness_of_fit.html

Arata, A. (2009). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales*. Citado el 20 de abril de 2013, de <http://books.google.com.mx/books?id=4ahVVXPe-nUC&pg=PA109&dq=funciones+de+confiabilidad&hl=es&sa=X&ei=-Nh1UeW5NoqH2gWtxlHwBw&ved=0CEQQ6AEwAw#v=onepage&q=funciones%20de%20confiabilidad&f=true>

Boggio, G. (2007). *Evaluación de criterios de bondad de ajuste para modelos logit marginales*. Citado el 19 de abril de 2005, de <http://www.fcecon.unr.edu.ar/revista/index.php/revista/article/view/9/57>

Canese, R. (2006). *El olvidado transporte eléctrico*. Citado el 8 de abril de 2013, de <http://archivo.abc.com.py/imprimir.php?pid=232527>

CramerVonMises Test. (2013). Citado el 19 de abril de 2013, de <http://reference.wolfram.com/mathematica/ref/CramerVonMisesTest.html>

Criterio de Cramér-von Mises. (2013). Citado el 19 de abril de 2013, de http://es.wikipedia.org/wiki/Criterio_de_Cram%C3%A9r-von_Mises

Díaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos*. Citado el 20 de abril de 2013, de <http://books.google.com.mx/books?id=0x0DW6dNiyAC&pg=PA90&lpg=PA90&dq=recorte+valores+extremos&source=bl&ots=gKKQuHjWTV&sig=GISYJp2yvNqIuseWcxncHK8oYQM&hl=en&sa=X&ei=PB9zUbrmFeae2wXY24H4AQ&ved=0CE0Q6AEwBQ#v=onepage&q=recorte%20valores%20extremos&f=false>

Distribución exponencial. (2013). Citado el 21 de abril de 2013 de http://www.sites.upiicsa.ipn.mx/polilibros/z_basura/Polilibros/Probabilidad/doc/Unidad%203/3.9.htm#item0

Escalona, I. *Factores universales para determinar la confiabilidad*. Citado el 5 de abril de 2005, de <http://www.monografias.com/trabajos16/confiabilidad/confiabilidad.shtml>

García, J. (2011). *Factores relacionados con el éxito del mantenimiento productivo total*. Citado el 14 de abril de 2005, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43021583012>

García, O. (2004). *La Cultura de la Confiabilidad Operacional*. Citado el 5 abril de 2005, de virtual.uptc.edu.co/drupal/files/105_cul_confiabilidad.pdf

Engineering Statistics Handbook. (2012). Citado el 13 de abril de 2013, de <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section2/prc213.htm>

Hernández, R. (2010). *Propuesta de mantenimiento preventivo basado en la confiabilidad del B.C.L. y del S.D.A.C. de la flota A320 de mexicana de aviación*. Citado el 23 de marzo de 2013, de <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/13412>

Huerta, R. (2005). *El análisis de criticidad: Una metodología para mejorar la confiabilidad operacional*. Citado el 5 abril de 2005, de <http://confiabilidad.net/articulos/el-analisis-de-criticidad-una-metodologia-para-mejorar-la-confiabilidad-ope/>

Ingeniería y mantenimiento. Citado el 14 de abril de 2013, de <http://ingenieriaymantenimiento.blogspot.mx/2007/11/niveles-de-mantenimiento.html>

Ivorra, C. (2013). *La catenaria*. Citado el 14 de abril de 2013, de www.uv.es/~ivorra/Libros/Catenaria.pdf

Kolmogorov-Smirnov Test. Citado el 23 de marzo de 2013, de <http://www.physics.csbsju.edu/stats/KS-test.html>

Kolmogorov-Smirnov Goodness-of-Fit Test (2005). Citado el 6 de abril de 2013, de <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35g.htm>

Marques Dos Santos, M. (2013). *Estadística Basica: Enfoque no paramétrico*. Citado el 14 de abril de 2013, de <http://www.buscalibre.com/estadistica-basica-enfoque-no-parametrico-maria-jose-marques-dos-santos/p/h5ks7pj>

Martínez, E. (2008). *Distribuciones de probabilidad más usadas en confiabilidad*. Citado el 23 de abril de 2013, de <http://www.uantof.cl/facultades/csbasicas/Matematicas/academicos/emartinez/magister/confiabilidad/seccion2/distribucion.html>

Méndez, M. (2008). *Análisis de confiabilidad utilizando modelos de componentes genéricos y matrices de propagación de fallas*, Tesis de maestría. Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico. Citado el 14 de abril de 2013, de www.cenidet.edu.mx/subaca/.../206MC_mamg.pdf

Murray, W. & Damian Lin. *Time to failure-probability, survival and hazard rate*. Citado el 21 de abril de 2013, de <http://www.omdec.com/articles/reliability/TimeToFailure.html>

- Olarte, W. (2010). *Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria*. Citado el 14 de abril de 2013, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84917249041>
- Osborne, J. & Amy O. (2004). *The power of outliers (and why researchers should always check for them)*. Citado el 20 de abril de 2013, de <http://PAREonline.net/getvn.asp?v=9&n=6>
- Padilla, E. (2006). *Los sistemas de mantenimiento*. Citado el 14 de abril de 2013, de www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_06_IND01.pdf
- Palacio, L. (2013). *Cálculo de los parámetros de la distribución de Weibull*, Citado el 21 de abril de 2013, de <http://confiabilidad.net/articulos/calculo-de-los-parametros-de-la-distribucion-de-weibull/>
- Pateiro, B. (2008). *Estadística*. Citado el 23 de abril de 2013, de <http://eio.usc.es/pub/pateiro/files/IQ0809Pateiro.pdf>
- Penkova V. (2007). *Mantenimiento y análisis de vibraciones*. Citado el 14 de abril de 2013, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87032407> ISSN 0378-7680
- Perea, M. & Algarabel S. (1999). *Puntuaciones atípicas y potencia estadística con diferentes procedimientos de análisis de los tiempos de reacción: Un estudio de simulación*. Citado el 20 de abril de 2013, de www.uv.es/~mperea/power.pdf
- Pérez, N. (2012). *Análisis sobre las pruebas de bondad de ajuste*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Citado el 20 de abril de 2013, de www.chapingo.mx/dicifo/.../perez_villalva_norma_yoana_2012.pdf
- Raña, L., et al. (2010). *Evaluación de la función mantenimiento en empresas transportistas*. Citado el 14 de abril de 2013, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93218512002>
- Rincón, F. (2011). *Módulo de test estadísticos para la librería JCLE*. Citado el 19 de abril de 2013, de forinconlievana.com/web/.../ManualTecnico1.pdf
- Ríos, M. & Ramos, G. (2011). *Características de un sistema eléctrico de transporte masivo con tranvías*. Citado el 14 de abril de 2013, de <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/1142/804>
- Rivera, J. *Conceptos básicos de confiabilidad*. Citado el 21 de abril de 2013, de www.depi.itchiuhua.edu.mx/jrivera/.../notas_inst...
- Ruiz-Falcó, A. (2012). *Concepto de fiabilidad (Reliability)*. Citado el 21 de abril de 2013, de www.aec.es/c/document.../get_file?p_l...
- Sánchez, A., et.al., (2003). *Evaluación de la confiabilidad de equipos mediante el seguimiento de indicadores: Aplicación a la industria ferroviaria*. Citado el 23 de marzo de 2013, de web.udl.es/usuarios/esi2009/treballs/11_1_3.pdf

Sánchez, C. (2004). *Pruebas de hipótesis no paramétricas de Kolmogorov-Smirnov para una y dos muestras*, Citado el 20 de abril de 2005, de <http://www.monografias.com/trabajos11/docima/docima.shtml>

Shapiro, M. & Wilk, B. (2007). *An analysis of variance test for normality (Complete Samples)*. Citado el 17 de abril de 2013, de <http://links.jstor.org/sici?sici=0006-3444%28196512%2952%3A3%2F4%3C591%3AAA0VTF%3E2.0.CO%3B2-B>

Soto, R., et al. (2012). *Metodología para realizar análisis de mantenimiento basado en confiabilidad en centrales hidroeléctricas*. Citado el 14 de abril de 2013, de www.iie.org.mx/boletin042012/tenden.pdf -

Suárez, M., et al. (2011). *Implementación del kaizen en México: un estudio exploratorio de una aproximación gerencial japonesa en el contexto latinoamericano*. Citado el 14 de abril de 2013, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81822806003>

Taylor, B., et al. (2011). *Nonparametric Goodness-of-Fit Tests for Discrete Null Distributions*. Citado el 14 de abril de 2013, de <http://journal.r-project.org/archive/>

Tamborero, J. *Fiabilidad: la distribución de Weibull*. Citado el 23 de abril de 2013, de www.insht.es/InshtWeb/.../NTP/.../ntp_331.pdf -

Troyer, D. (2010). *Ingeniería de Factores Humanos: La próxima frontera en la confiabilidad*. Citado el 23 de marzo de 2013, de http://www.machinerylubrication.com/sp/print_ingenieria_de_factores_humanos_la_proxima_frontera_en_la_confiabilidad.asp

Villa, E. (2009). *El proceso de Poisson en confiabilidad*. Citado el 21 de abril de 2013, de www.cimat.mx/Eventos/.../PlaticaEnriqueVilla.pdf -

Wang, H. (2009). *Comparison of the Goodness-of-Fit Tests: the Pearson Chi-square and Kolmogorov-Smirnov Tests*. Citado el 20 de abril de 2013, de <http://www.docstoc.com/docs/79026339/Comparison-of-the-Goodness-of-Fit-Tests-the-Pearson-Chi-square>.

Cómo elaborar citas y referencias bibliográficas estilo APA. Citado el 6 de abril de 2013, de <http://www.dgbiblio.unam.mx/index.php/ayuda/170-como-elaborar-citas-y-referencias-bibliograficas-estilo-apa>.

Anexo 1. Fallas del tren ligero por año

Fallas del tren ligero				
Falla	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Sistema de puertas	61	119	39	30
Carros bloqueados	77	92	34	26
Sistema de frenado	74	108	22	21
Motocompresor	79	67	26	27
Sistema de tracción	58	84	17	7
Fanales principales	27	59	20	3
Tubería de equilibrio	31	50	17	8
Electrónica de mandos	33	47	3	22
Fusible principal	31	52	11	10
Cerradura de puerta	36	34	14	5
velocímetro	34	33	6	3
Torreta	31	25	8	11
Limpiaparabrisas	13	45	14	3
Claxon	12	39	17	5
Bloque de señalización	18	35	2	0
Bandera de destino	9	41	5	0
Asiento de operador	11	31	12	0
Motriz Inactiva	7	21	7	9
Pantógrafo	13	19	5	1
Ventilación de Equipo	15	13	2	7
Paratren desprendido	21	15	1	0
Ventanilla de cabina	0	20	5	0
Manipulador	0	15	3	6
Convertidor	6	0	1	9
Fuga de aire	0	9	0	6
Elastómero desprendido	10	0	4	0
Sistema de suspensión	8	0	1	2
Filtración de agua	0	8	0	3

Anexo 2. Tabla de datos sobre el tiempo de ocurrencia de fallas

Tabla 8. Fallas y sus tiempos de ocurrencia			
Número de falla	Descripción de la falla	Tiempo de ocurrencia de fallas (x)	
		Días	Horas
Falla 1	Motocompresor	28.25	678.08
Falla 2	Torreata	21.46	514.97
Falla 3	Ventilación de equipo	10.85	260.28
Falla 4	Ventilación de equipo	23.90	573.53
Falla 5	Carro bloqueado	3.16	75.83
Falla 6	Sistema de suspensión	4.06	97.48
Falla 7	Tubería de equilibrio	7.03	168.78
Falla 8	Carro bloqueado	32.57	781.62
Falla 9	Sistema de frenado	4.62	110.95
Falla 10	Velocímetro	2.89	69.27
Falla 11	Velocímetro	1.97	47.25
Falla 12	Motocompresor	5.02	120.37
Falla 13	Torreata	6.91	165.92
Falla 14	Electrónica de mandos	6.81	163.42
Falla 15	Carro bloqueado	37.96	910.97
Falla 16	Puertas	0.26	6.20
Falla 17	Fanales principales	8.19	196.53
Falla 18	Motocompresor	1.80	43.28
Falla 19	Motocompresor	0.98	23.52
Falla 20	Motocompresor	1.96	47.05
Falla 21	Carro bloqueado	1.01	24.33
Falla 22	Motocompresor	3.19	76.67
Falla 23	Motocompresor	0.78	18.80
Falla 24	Motocompresor	3.20	76.73
Falla 25	Motocompresor	0.73	17.60
Falla 26	Motocompresor	1.02	24.43
Falla 27	Motocompresor	2.17	52.08
Falla 28	Motocompresor	4.89	117.40
Falla 29	Motocompresor	2.09	50.15
Falla 30	Equipo desprendido	1.05	25.32
Falla 31	Motocompresor	5.90	141.53

Tabla 8. Fallas y sus tiempos de ocurrencia

Número de falla	Descripción de la falla	Tiempo de ocurrencia de fallas (x)	
		Días	Horas
Falla 32	Motocompresor	1.15	27.60
Falla 33	Motocompresor	0.98	23.48
Falla 34	Carro bloqueado	4.71	113.12
Falla 35	Motocompresor	1.45	34.68
Falla 36	Fanales principales	0.89	21.35
Falla 37	Motocompresor	0.82	19.67
Falla 38	Equipo desprendido	0.78	18.70
Falla 39	Bloque de señalización	0.91	21.73
Falla 40	Bloque de señalización	2.53	60.65
Falla 41	Sistema de tracción	1.74	41.67
Falla 42	Fanales principales	5.85	140.47
Falla 43	Puertas	0.34	8.27
Falla 44	Equipo desprendido	1.98	47.47
Falla 45	Motocompresor	3.83	91.83
Falla 46	Motocompresor	1.01	24.23
Falla 47	Equipo desprendido	1.87	44.82
Falla 48	Motocompresor	0.26	6.32
Falla 49	Equipo desprendido	0.55	13.30
Falla 50	Motocompresor	2.56	61.47
Falla 51	Pantógrafo	0.78	18.60
Falla 52	Puertas	0.58	14.03
Falla 53	Puertas	0.45	10.87
Falla 54	Equipo desprendido	1.60	38.42
Falla 55	Motocompresor	1.22	29.25
Falla 56	Puertas	0.89	21.38
Falla 57	Motocompresor	0.42	10.07
Falla 58	Motocompresor	1.01	24.13
Falla 59	Motocompresor	1.91	45.92
Falla 60	Electrónica de mandos	1.05	25.25
Falla 61	Ventilación de equipo	2.46	59.05
Falla 62	Electrónica de mandos	3.67	87.98
Falla 63	Electrónica de mandos	0.93	22.22
Falla 64	Reductor	0.72	17.38
Falla 65	Reductor	0.81	19.33

Tabla 8. Fallas y sus tiempos de ocurrencia

Número de falla	Descripción de la falla	Tiempo de ocurrencia de fallas (x)	
		Días	Horas
Falla 66	Reductor	0.96	23.02
Falla 67	Fanales principales	5.51	132.20
Falla 68	Ventilación de equipo	1.99	47.83
Falla 69	Ruedas cuadradas	0.45	10.80
Falla 70	Puertas	1.53	36.62
Falla 71	Puertas	1.50	35.88
Falla 72	Ventilación de equipo	0.50	11.90
Falla 73	Electrónica de mandos	9.60	230.48
Falla 74	Ventilación de equipo	0.05	1.30
Falla 75	Carro bloqueado	0.44	10.50
Falla 76	Bandera de destino	0.99	23.65
Falla 77	Electrónica de mandos	18.83	451.87
Falla 78	Electrónica de mandos	3.11	74.68
Falla 79	Electrónica de mandos	0.48	11.62
Falla 80	Bandera de destino	3.93	94.22
Falla 81	Tubería de equilibrio	1.13	27.20
Falla 82	Asiento de operador	12.02	288.38
Falla 83	Electrónica de mandos	1.41	33.92
Falla 84	Electrónica de mandos	0.01	0.32
Falla 85	Bandera de destino	2.07	49.58
Falla 86	Bandera de destino	1.37	32.95
Falla 87	Sistema de frenado	5.25	125.97
Falla 88	Sistema de frenado	2.01	48.28

Anexo 3. Prueba de bondad de ajuste tren 26

Tabla 9. Prueba de bondad de ajuste tren 26							
x_r modificado	Cuenta de x_r modificado	Total	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada relativa	Frecuencia acumulada esperada	Valor absoluto de la diferencia
0.3	x_r modificado						
1.3	0.3	1	1	1	0.011363636	0.003950509	0.007413127
6.2	1.3	1	1	2	0.022727273	0.016118681	0.006608592
6.3	6.2	1	1	3	0.034090909	0.074572976	0.040482067
8.3	6.3	1	1	4	0.05	0.075921573	0.025921573
10.1	8.3	1	1	5	0.0625	0.098173685	0.035673685
10.5	10.1	1	1	6	0.075	0.118238205	0.043238205
10.8	10.5	1	1	7	0.0875	0.123001503	0.035501503
10.9	10.8	1	1	8	0.1	0.126284088	0.026284088
11.6	10.9	1	1	9	0.1125	0.127011882	0.014511882
11.9	11.6	1	1	10	0.125	0.135157901	0.010157901
13.3	11.9	1	1	11	0.1375	0.138215466	0.000715466
14.0	13.3	1	1	12	0.15	0.153165501	0.003165501
17.4	14.0	1	1	13	0.1625	0.16089268	0.00160732
17.6	17.4	1	1	14	0.175	0.195304768	0.020304768
18.6	17.6	1	1	15	0.1875	0.197481202	0.009981202
18.7	18.6	1	1	16	0.2	0.207450251	0.007450251
18.8	18.7	1	1	17	0.2125	0.208440319	0.004059681
19.3	18.8	1	1	18	0.225	0.20942915	0.01557085
19.7	19.3	1	1	19	0.2375	0.214682093	0.022817907
21.4	19.7	1	1	20	0.25	0.217947444	0.032052556
21.4	21.4	1	1	21	0.2625	0.234231213	0.028268787
21.7	21.4	1	1	22	0.275	0.234550217	0.040449783
22.2	21.7	1	1	23	0.2875	0.237891745	0.049608255
23.0	22.2	1	1	24	0.3	0.242482268	0.057517732
23.5	23.0	1	1	25	0.3125	0.250019695	0.062480305
23.5	23.5	1	1	26	0.325	0.254381845	0.070618155
23.7	23.5	1	1	27	0.3375	0.254692455	0.082807545

Tabla 9. Prueba de bondad de ajuste tren 26

x_r modificado	Cuenta de x_r modificado	Total	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada relativa	Frecuencia acumulada esperada	Valor absoluto de la diferencia
0.3	x_r modificado						
24.1	23.7	1	1	28	0.35	0.255933599	0.094066401
24.2	24.1	1	1	29	0.3625	0.260415448	0.102084552
24.3	24.2	1	1	30	0.375	0.261339351	0.113660649
24.4	24.3	1	1	31	0.3875	0.2622621	0.1252379
25.3	24.4	1	1	32	0.4	0.263183696	0.136816304
25.3	25.3	1	1	33	0.4125	0.270667101	0.141832899
27.2	25.3	1	1	34	0.425	0.271274626	0.153725374
27.6	27.2	1	1	35	0.4375	0.288229677	0.149270323
29.3	27.6	1	1	36	0.45	0.291779647	0.158220353
33.0	29.3	1	1	37	0.4625	0.306237086	0.156262914
33.9	33.0	1	1	38	0.475	0.337592928	0.137407072
34.7	33.9	1	1	39	0.4875	0.34554885	0.14195115
35.9	34.7	1	1	40	0.5	0.351790717	0.148209283
36.6	35.9	1	1	41	0.5125	0.361441296	0.151058704
38.4	36.6	1	1	42	0.525	0.367268004	0.157731996
41.7	38.4	1	1	43	0.5375	0.381345508	0.156154492
43.3	41.7	1	1	44	0.55	0.405974679	0.144025321
44.8	43.3	1	1	45	0.5625	0.417858461	0.144641539
45.9	44.8	1	1	46	0.575	0.428909926	0.146090074
47.0	45.9	1	1	47	0.5875	0.436708675	0.150791325
47.3	47.0	1	1	48	0.6	0.444632377	0.155367623
47.5	47.3	1	1	49	0.6125	0.446019062	0.166480938
47.8	47.5	1	1	50	0.625	0.447517397	0.177482603
48.3	47.8	1	1	51	0.6375	0.450043815	0.187456185
49.6	48.3	1	1	52	0.65	0.453128634	0.196871366
50.2	49.6	1	1	53	0.6625	0.461943479	0.200556521
52.1	50.2	1	1	54	0.675	0.465741246	0.209258754
59.1	52.1	1	1	55	0.6875	0.478497738	0.209002262
60.7	59.1	1	1	56	0.7	0.521990657	0.178009343

Tabla 9. Prueba de bondad de ajuste tren 26

x_r modificado	Cuenta de x_r modificado	Total	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada relativa	Frecuencia acumulada esperada	Valor absoluto de la diferencia
0.3	x_r modificado						
61.5	60.7	1	1	57	0.7125	0.531455876	0.181044124
69.3	61.5	1	1	58	0.725	0.5362146	0.1887854
74.7	69.3	1	1	59	0.7375	0.579299178	0.158200822
75.8	74.7	1	1	60	0.75	0.606841196	0.143158804
76.7	75.8	1	1	61	0.7625	0.612452426	0.150047574
76.7	76.7	1	1	62	0.775	0.616468427	0.158531573
88.0	76.7	1	1	63	0.7875	0.616787904	0.170712096
91.8	88.0	1	1	64	0.8	0.667059561	0.132940439
94.2	91.8	1	1	65	0.8125	0.682702883	0.129797117
97.5	94.2	1	1	66	0.825	0.692016273	0.132983727
111.0	97.5	1	1	67	0.8375	0.704338975	0.133161025
113.1	111.0	1	1	68	0.85	0.750145118	0.099854882
117.4	113.1	1	1	69	0.8625	0.756821207	0.105678793
120.4	117.4	1	1	70	0.875	0.769498982	0.105501018
126.0	120.4	1	1	71	0.8875	0.77789018	0.10960982
132.2	126.0	1	1	72	0.9	0.792906176	0.107093824
140.5	132.2	1	1	73	0.9125	0.808429616	0.104070384
141.5	140.5	1	1	74	0.925	0.827236787	0.097763213
163.4	141.5	1	1	75	0.9375	0.829525008	0.107974992
165.9	163.4	1	1	76	0.95	0.870322974	0.079677026
168.8	165.9	1	1	77	0.9625	0.874312716	0.088187284
196.5	168.8	1	1	78	0.975	0.878736773	0.096263227
230.5	196.5	1	1	79	0.9875	0.914279791	0.073220209
260.3	230.5	1	1	80	1	0.94392368	0.05607632
288.4	260.3	1	1	81	1.0125	0.961362875	0.051137125
451.9	288.4	1	1	82	1.025	0.972806891	0.052193109
515.0	451.9	1	1	83	1.0375	0.996476616	0.041023384
573.5	515.0	1	1	84	0.954545455	0.99839893	0.043853476
677.1	573.5	1	1	85	0.965909091	0.999230036	0.033320945

Tabla 9. Prueba de bondad de ajuste tren 26

x_r modificado	Cuenta de x_r modificado	Total	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada relativa	Frecuencia acumulada esperada	Valor absoluto de la diferencia
0.3	x_r modificado						
781.6	677.1	1	1	86	0.977272727	0.999788977	0.022516249
911.0	781.6	1	1	87	0.988636364	0.999942872	0.011306508
	911.0	1	1	88	1	0.999988659	1.1341E-05

Anexo 4. Prueba de bondad de ajuste a datos modificados

Tabla 10. Prueba de bondad de ajuste a datos modificados					
Xr ordenados	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada relativa $S_n(X_r)$	Frecuencia acumulada esperada	Valor absoluto de la diferencia de frecuencias
8.26667	1	1	0.0125	0.097242457	0.084742457
10.06667	1	2	0.025	0.117129314	0.092129314
10.50000	1	3	0.0375	0.121851095	0.084351095
10.80000	1	4	0.05	0.125105219	0.075105219
10.86667	1	5	0.0625	0.125826718	0.063326718
11.61667	1	6	0.075	0.133902703	0.058902703
11.90000	1	7	0.0875	0.136934176	0.049434176
13.30000	1	8	0.1	0.151758191	0.051758191
14.03333	1	9	0.1125	0.159421256	0.046921256
17.38333	1	10	0.125	0.193556472	0.068556472
17.60000	1	11	0.1375	0.195715879	0.058215879
18.60000	1	12	0.15	0.205607686	0.055607686
18.70000	1	13	0.1625	0.20659015	0.04409015
18.80000	1	14	0.175	0.2075714	0.0325714
19.33333	1	15	0.1875	0.212784272	0.025284272
19.66667	1	16	0.2	0.216024888	0.016024888
21.35000	1	17	0.2125	0.232187343	0.019687343
21.38333	1	18	0.225	0.232504004	0.007504004
21.73333	1	19	0.2375	0.235821073	0.001678927
22.21667	1	20	0.25	0.240378232	0.009621768
23.01667	1	21	0.2625	0.247861477	0.014638523
23.48333	1	22	0.275	0.252192612	0.022807388
23.51667	1	23	0.2875	0.252501023	0.034998977
23.65000	1	24	0.3	0.253733395	0.046266605
24.13333	1	25	0.3125	0.258183734	0.054316266
24.23333	1	26	0.325	0.259101175	0.065898825
24.33333	1	27	0.3375	0.260017482	0.077482518
24.43333	1	28	0.35	0.260932655	0.089067345
25.25000	1	29	0.3625	0.26836433	0.09413567
25.31667	1	30	0.375	0.268967688	0.106032312
27.20000	1	31	0.3875	0.285808507	0.101691493
27.60000	1	32	0.4	0.289335063	0.110664937
29.25000	1	33	0.4125	0.303698984	0.108801016
32.95000	1	34	0.425	0.334862361	0.090137639
33.91667	1	35	0.4375	0.342771765	0.094728235
34.68333	1	36	0.45	0.348977808	0.101022192
35.88333	1	37	0.4625	0.358574177	0.103925823
36.61667	1	38	0.475	0.364368854	0.110631146
38.41667	1	39	0.4875	0.378371181	0.109128819
41.66667	1	40	0.5	0.402876527	0.097123473
43.28333	1	41	0.5125	0.414704167	0.097795833
44.81667	1	42	0.525	0.425705585	0.099294415
45.91667	1	43	0.5375	0.433470295	0.104029705
47.05000	1	44	0.55	0.441360512	0.108639488

Tabla 10. Prueba de bondad de ajuste a datos modificados

Xr ordenados	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada relativa $S_n(X_r)$	Frecuencia acumulada esperada	Valor absoluto de la diferencia de frecuencias
47.25000	1	45	0.5625	0.442741452	0.119758548
47.46667	1	46	0.575	0.444233619	0.130766381
47.83333	1	47	0.5875	0.446749727	0.140750273
48.28333	1	48	0.6	0.449822115	0.150177885
49.58333	1	49	0.6125	0.458602394	0.153897606
50.15000	1	50	0.625	0.462385711	0.162614289
52.08333	1	51	0.6375	0.475095641	0.162404359
59.05000	1	52	0.65	0.51845364	0.13154636
60.65000	1	53	0.6625	0.527894601	0.134605399
61.46667	1	54	0.675	0.532641846	0.142358154
69.26667	1	55	0.6875	0.575645285	0.111854715
74.68333	1	56	0.7	0.603158236	0.096841764
75.83333	1	57	0.7125	0.608765864	0.103734136
76.66667	1	58	0.725	0.612779783	0.112220217
76.73333	1	59	0.7375	0.613099112	0.124400888
87.98333	1	60	0.75	0.663382225	0.086617775
91.83333	1	61	0.7625	0.679044093	0.083455907
94.21667	1	62	0.775	0.688372166	0.086627834
97.48333	1	63	0.7875	0.700718639	0.086781361
110.95000	1	64	0.8	0.746660096	0.053339904
113.11667	1	65	0.8125	0.753362598	0.059137402
117.40000	1	66	0.825	0.766095633	0.058904367
120.36667	1	67	0.8375	0.774527231	0.062972769
125.96667	1	68	0.85	0.789623552	0.060376448
132.20000	1	69	0.8625	0.805241548	0.057258452
140.46667	1	70	0.875	0.824180338	0.050819662
141.53333	1	71	0.8875	0.826485936	0.061014064
163.41667	1	72	0.9	0.867650114	0.032349886
165.91667	1	73	0.9125	0.871682048	0.040817952
168.78333	1	74	0.925	0.876154385	0.048845615
196.53333	1	75	0.9375	0.912150488	0.025349512
230.48333	1	76	0.95	0.942286632	0.007713368
260.28333	1	77	0.9625	0.960086713	0.002413287
288.38333	1	78	0.975	0.971809995	0.003190005
451.86667	1	79	0.9875	0.996272133	0.008772133
514.96667	1	80	1	0.998292613	0.001707387

Apéndice 1. Determinación del modelo probabilístico y parámetros de confiabilidad para el tren 32

La función de densidad de probabilidad.

$$f(x) = 0.01418e^{-0.01418x}, \quad x \geq 0$$

La función de distribución acumulada:

$$F(x) = 1 - e^{-0.01418x}$$

La función de confiabilidad

$$R(x) = e^{-0.01418x}$$

Tasa de fallas λ representa la tasa de fallas:

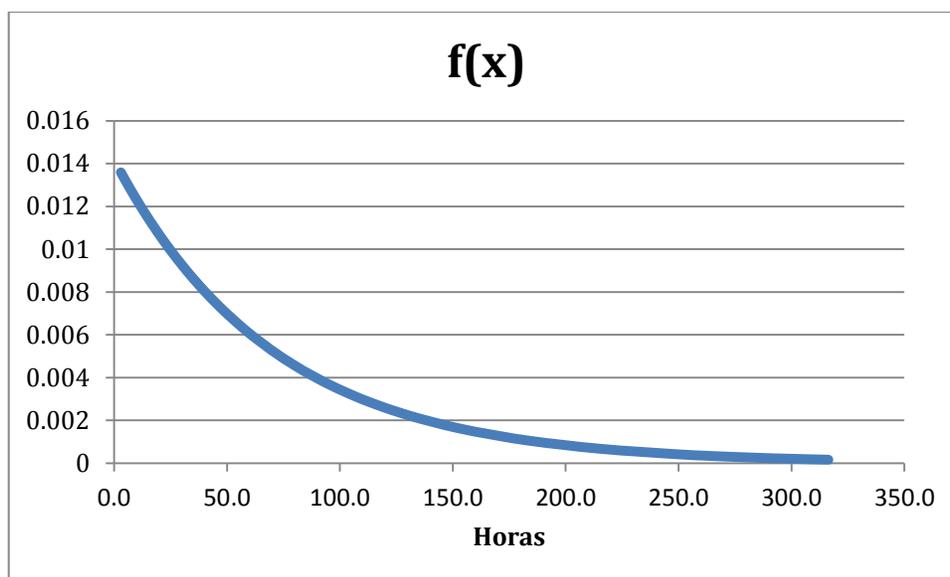
$$\lambda = 0.01418$$

MTBF (tiempo de buen funcionamiento) que es igual al recíproco de la tasa de fallas:

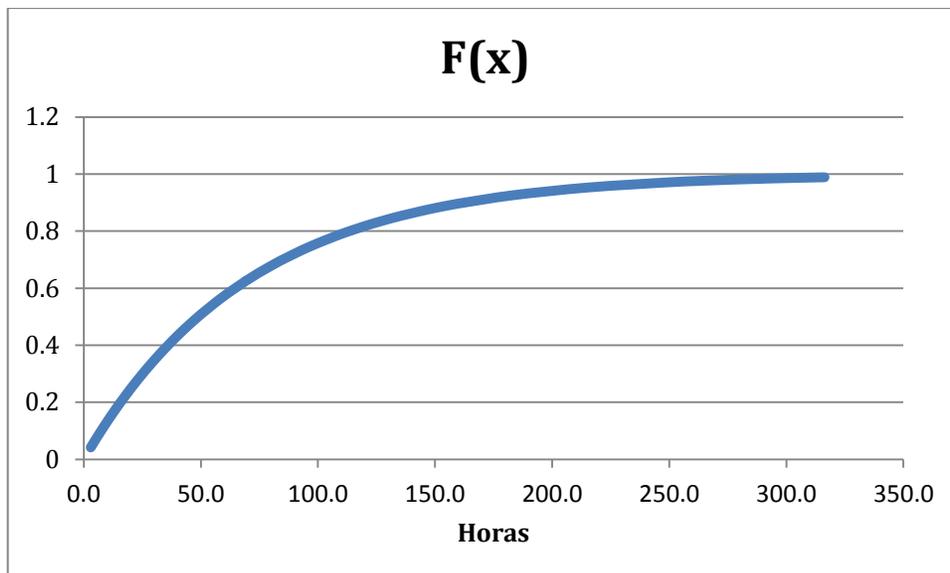
$$MTBF = 70.5155$$

Gráfica de la función de probabilidad

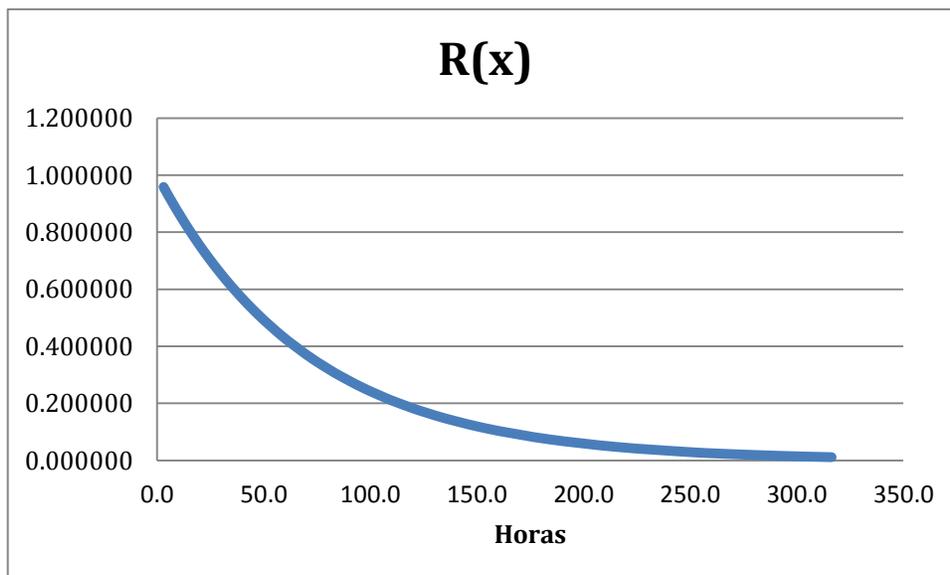
Si llevamos a un gráfico esta función, con los valores de $f(x)$ en ordenadas y los valores correspondientes de x en abscisas, se obtiene la “curva de supervivencia”.



Gráfica de la función de densidad, indica la probabilidad de falla en un determinado tiempo.



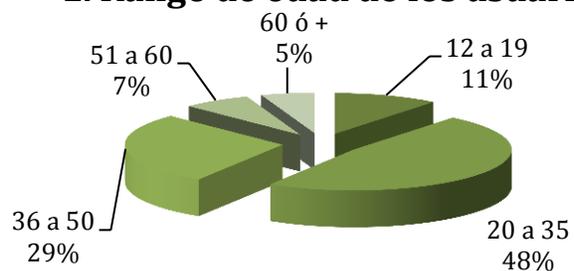
Gráfica de la función de distribución acumulada, es la integral de la función de densidad y representa la probabilidad de falla antes del tiempo t .



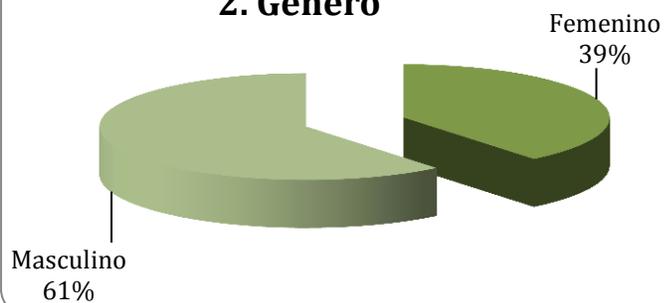
Gráfica de la función de confiabilidad, representa la probabilidad de no presentar falla en el tiempo t .

Apéndice 2. Encuesta de evaluación del servicio del tren ligero

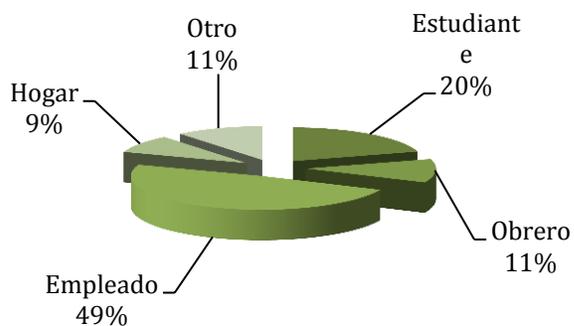
1. Rango de edad de los usuarios



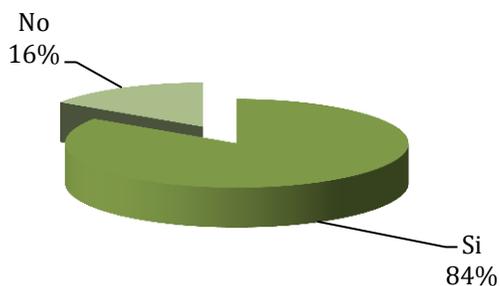
2. Género



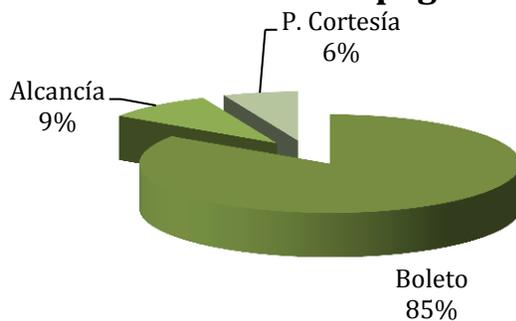
3. Ocupación



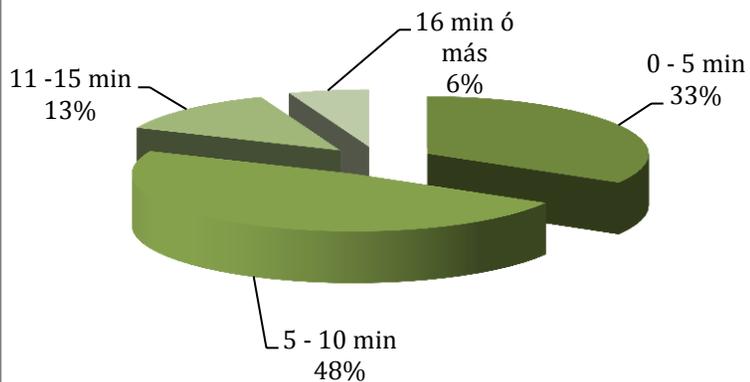
4. ¿El horario de la taquilla cubre sus necesidades?



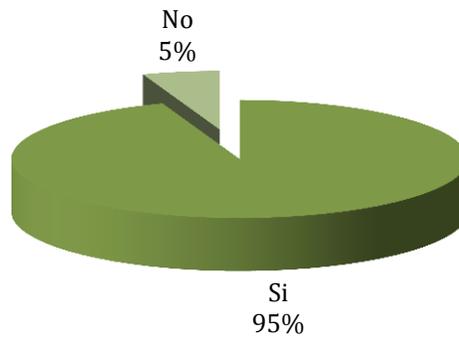
5. Forma de pago



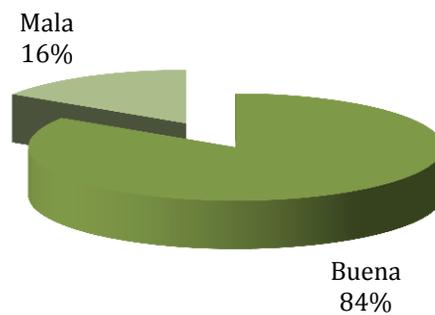
6. Tiempo de espera para abordar el tren



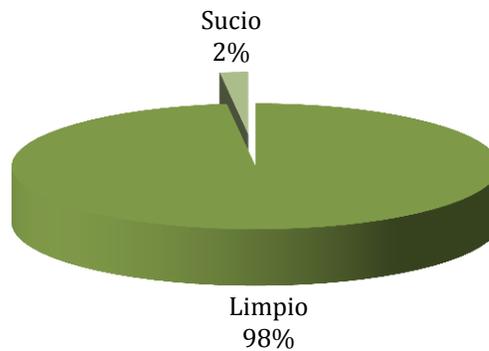
7. ¿El tren lo llevó a su destino?



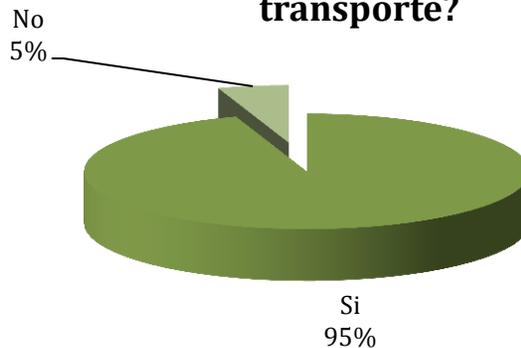
8. ¿Cómo considera la accesibilidad a las estaciones?



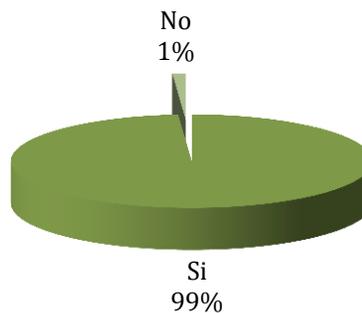
9. Los trenes regularmente se encuentran:



10. Se siente más seguro en el tren ligero que en otro modo de transporte?



11. ¿ El operador conduce con precaución?



12. Cuando intenta abordar el tren, regularmente se encuentra:

