

TÉCNICA PARA IMPLEMENTAR LA CURVA DE PROBABILIDAD DE FALLA (P-F)
MEDIANTE LA PREDICTIVE MAINTENANCE TOOLBOX DE MATLAB

CAMILA ALEJANDRA GRANADOS BAYONA - 2175563
HÉCTOR DANIEL PÉREZ BERNAL - 2175521

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA, SANTANDER

2022

TÉCNICA PARA IMPLEMENTAR LA CURVA DE PROBABILIDAD DE FALLA (P-F)
MEDIANTE LA PREDICTIVE MAINTENANCE TOOLBOX DE MATLAB

CAMILA ALEJANDRA GRANADOS BAYONA - 2175563

HÉCTOR DANIEL PÉREZ BERNAL - 2175521

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero Mecánico por la Universidad Industrial
de Santander

Director:

Alberto David Pertuz Comas

Doctor en ing. Mecánica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA, SANTANDER

2022

AGRADECIMIENTO

La vida siempre me ha dado grandes cosas porque agradecer, me han acompañado a lo largo de esta aventura personas muy importantes, por lo que agradezco en primera medida a mi madre, quien no solo ha tenido grandes bendiciones para mí, sino que me ha apoyado e incentivado en los momentos más oscuros de este trayecto; a mi hermana por ser esa persona incondicional con quien he pasado mis momentos más felices y los tristes también; a todos mis amigos con quienes hemos afrontado las duras pruebas que se han presentado a lo largo de esta carrera, pero con quienes he compartido algunos de los momentos más felices en mi vida y que quedarán guardados en mi memoria, por último quiero agradecer a cada una de las personas que han tocado mi proceso de alguna manera entre ellos algunos profesores y compañeros; todos los aquí mencionados han hecho de mí una gran mujer y una gran profesional.

Camila Alejandra Granados Bayona

DEDICATORIA

Este triunfo que hoy logró conseguir solo es la continuación del trabajo de los que vinieron antes de mí, por lo que este arduo trabajo está dedicado a mi Papá y a mi Abuelo, son las personas a quienes más he admirado y quienes me han dado las lecciones más importantes de la vida. Pero con una especial mención para mi compañero de tesis el Ing. Héctor Daniel Pérez Bernal quien ha tenido un especial trato hacia mí y a quien solo le deseo que tenga muchos éxitos porque los merece y lo admiro.

Camila Alejandra Granados Bayona

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento al creador por darme la fortaleza, el conocimiento y la perseverancia para culminar este sueño. A mis amados padres, hermanos y a mi famili3n por estar a mi lado, apoy3ndome y brind3ndome la fuerza para seguir siempre adelante.

Expreso mi agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander que me permite convertirme en una profesional competente y con orgullo decir que soy egresado de tan prestigiosa instituci3n.

Mi especial agradecimiento a mi director de tesis Ing. Alberto David Pertuz Comas, por guiar el presente proyecto investigativo, siempre con palabras de aliento y fuerza, apoy3ndonos desde su gran conocimiento y experiencia profesional para que cada d3a fuese un mejor ingeniero.

Mi m3s sincero agradecimiento a la Ing. Camila Alejandra Granados Bayona, mi compa3era de tesis y m3s que eso una gran mujer, digna de admirar y seguir sus pasos, me siento honrado de hoy poder contar con su amistad, gracias por su esfuerzo, paciencia y dedicaci3n que hicieron posible culminar con satisfacci3n este proyecto.

Y finalmente a mis amigos y colegas, que de alguna u otra forma me brindaron su ayuda, sus consejos, su apoyo y momentos compartidos durante todo este proceso de formaci3n que me permitieron llegar hasta aqu3.

H3ctor Daniel P3rez Bernal

DEDICATORIA

Primordialmente al creador, el que me ha dado la fuerza para continuar cuando a punto de caer he estado y me permite vivir este momento tan importante de mi vida.

Le dedico este trabajo a mis padres, Alicia Inés Bernal Hernández y Héctor Alberto Pérez; su ejemplo, esfuerzo y dedicación me permitieron superar todos los obstáculos y momentos difíciles llegando a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre, para seguir creciendo íntegramente como persona y profesional.

A mi hermana Mayra Alejandra Pérez Bernal, por su apoyo fundamental para culminar este proceso de mi vida, finalmente a su esposo Cristhian Fernando Pava Sánchez, que ha sido un ejemplo para seguir como profesional y como persona.

Héctor Daniel Pérez Bernal

CONTENIDO

	pág.
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	17
2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	18
3. OBJETIVOS.....	19
3.1. OBJETIVO GENERAL	19
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
4. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	20
5. MARCO TEÓRICO	21
5.1. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN.....	21
5.2. REFERENTES TEÓRICOS	24
5.2.1. Técnica.....	24
5.2.2. Mantenimiento.....	24
5.2.3. Curva de probabilidad de falla (P-F).....	25
5.2.4. Predictive Maintenance Toolbox de Matlab	25
5.2.5. Distribución normal.....	26
6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	27
6.1. CURVA DE PROBABILIDAD DE FALLA (P-F) POR F. STANLEY NOWLAN Y HOWARD F. HEAP	29
6.1.1. Tareas programadas en condición	29
6.1.2. Ejemplo artículo con fisura visible como medida de la fatiga del metal	30
6.2. CURVA DEL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS (D-I-P-F) POR DOUGLASS PLUNCKKETTE	32
6.2.1. Punto (D).....	32
6.2.2. Punto (I).....	33
6.2.3. Dominio o zona proactiva.....	34
6.2.4. Punto (P)	35
6.2.5. Dominio o zona correctiva o síntomas	36
6.2.6. Punto (F)	37
6.2.7. Dominio o zona reactiva	38

6.3. INDICADOR DE RIESGO Y VIDA ÚTIL REMANENTE (RUL).....	38
7. DESARROLLO DE LA TÉCNICA	41
7.1. CONCEPTOS PARA TENER EN CUENTA EN EL DISEÑO DE LA TÉCNICA...	41
7.2. FLUJO DE TRABAJO	45
7.2.1. Eje X: Tiempo de frecuencia de falla.....	46
7.2.1.1 Adquirir datos	46
7.2.1.2 Identificación del modo de falla.....	46
7.2.1.3 Identificación de condición de operación, indicadores y límites permisibles	47
7.2.1.4 Proceso de datos.....	47
7.2.2. Eje Y: Indicador de estado o porcentaje de confiabilidad.....	48
7.2.2.1. Tabla de fiabilidad	48
7.3. PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN.....	51
7.4. ENTRENAMIENTO EL MODELO	52
8. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA EN LA PREDICTIVE MAINTENANCE TOOLBOX DE MATLAB.....	53
8.1. SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE MATLAB Y MICROSOFT EXCEL (SIN LA TOOLBOX)	53
8.1.1. Ejemplo 1: Base de datos prensa hidráulica PH.08.....	54
8.1.1.1. Aplicación de la distribución Weibull	54
8.1.1.2. Gráfica (P-F).....	62
8.2. SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE PREDICTIVE MAINTENANCE TOOLBOX DE MATLAB	63
8.2.1. Escenario experimental	63
8.2.2. Preparación de datos.....	65
8.2.3. Régimen de Trabajo Clustering.....	67
8.2.4. Normalización del Régimen de Trabajo.....	70
8.2.5. Análisis de tendencia	73
8.2.6. Construir indicador de riesgo.....	75
8.3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	79
8.3.1. Construcción de la curva P-F en Microsoft Excel sin la Toolbox.....	79
8.3.2. Construcción de la curva P-F con la Toolbox	81
8.3.3. Análisis de resultados	82
9. CONCLUSIONES	84

10. RECOMENDACIONES.....	86
REFERENCIAS.....	87
ANEXOS	92

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Data de una prensa hidráulica PH-08.....	55
Tabla 2. Resumen de la toma de datos	56
Tabla 3. Tabla de fiabilidad	57
Tabla 4. Confiabilidad vs Tiempo	80
Tabla 5. Matriz de calidad con los requerimientos y especificaciones técnicas.....	95
Tabla 6. Evaluación de las alternativas de software.....	99
Tabla 7. Evaluación de las alternativas de software.....	105
Tabla 8. Presupuesto general del proyecto de investigación.....	106
Tabla 9. Data del compresor de gas natural	111
Tabla 10. Resumen de la toma de datos	112
Tabla 11. Tabla de fiabilidad.....	112

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Portada libro ROM 0.0.	22
Figura 2. Portada libro electrónico Predictive Maintenance with MATLAB.	23
Figura 3. Curva P-F, EVTECH.	25
Figura 4. Curva distribución normal.....	26
Figura 5. Determinación del intervalo para la inspección en condición de un artículo sujeto a fatiga del metal.....	31
Figura 6. Dominio de diseño de la curva (D-I-P-F).....	32
Figura 7. Dominio o zona proactiva	34
Figura 8. Dominio o zona correctiva o síntomas	37
Figura 9. Dominio o zona reactiva	38
Figura 10. Curva P-F y de distribución de tiempo	42
Figura 11. Curva de probabilidad de falla.....	43
Figura 12. Función de densidad de probabilidad y Función de distribución acumulada.	49
Figura 13. Función de densidad de probabilidad y función de confiabilidad.	50
Figura 14. Fusión entre la curva de confiabilidad y la curva P-F	51
Figura 15. Distribución Weibull.....	56
Figura 16. Histograma Weibull	57
Figura 17. Histograma en forma de gráfico de dispersión	58
Figura 18. Función de Densidad de Probabilidad, indicando mortalidad infantil.....	59
Figura 19. Función de Densidad de Probabilidad indicando falla aleatoria	59
Figura 20. Tiempo Vs % de confiabilidad	60
Figura 21. Función de Distribución Acumulada	61
Figura 22. Función de confiabilidad.....	61
Figura 23. Construcción de la curva P.F mediante coordenadas.....	62
Figura 24. Lectura de la data.....	65

Figura 25. Data en forma de tabla leída por la Toolbox	66
Figura 26. Datos del conjunto	67
Figura 27. Diagrama de dispersión.....	68
Figura 28. Análisis de costo	69
Figura 29. Diagrama de dispersión con sus respectivos centroides	70
Figura 30. Normalización de las medidas de agrupación	71
Figura 31. Normalización de las medidas de agrupación en estadísticas centrales	71
Figura 32. Régimen de trabajo normalizado	72
Figura 33. Sensores con mayor pendiente.....	73
Figura 34. Visualización de los sensores seleccionados	74
Figura 35. Estado de salud del activo	76
Figura 36. Coeficientes de estimación	77
Figura 37. Coeficientes de estimación para cada sensor	77
Figura 38. Indicador de riesgo fusionado a los datos de entrenamiento.....	78
Figura 39. Curva P-F obtenida por método estadístico Weibull sin la Toolbox.....	80
Figura 40. Curva P-F obtenida con la Toolbox de Matlab.....	81
Figura 41. Interfaz Predictive Maintenance Toolbox.....	97
Figura 42. Interfaz MySQL Enterprise Edition.	98
Figura 43. Interfaz Python.....	99
Figura 44. Curva P-F y de distribución de tiempo	101
Figura 45. Función probabilidad acumulada e histograma.....	103
Figura 46. Curva de la bañera.....	108
Figura 47. Función densidad de probabilidad e histograma.....	110
Figura 48. Distribución Weibull.....	111
Figura 49. Histograma Weibull	113
Figura 50. Histograma en forma de gráfico de dispersión	114
Figura 51. Tiempo Vs % de confiabilidad	115
Figura 52. Función de Densidad de Probabilidad	116
Figura 53. Función de Distribución Acumulada	116
Figura 54. Función de confiabilidad.....	117

Figura 55. Construcción de la curva P.F mediante coordenadas 118

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Normas de documentación	92
Anexo B. Definiciones	92
Anexo C. Despliegue de la función calidad	94
Anexo D. Diseño metodológico	100
Anexo E. Cronograma	105
Anexo F. Presupuesto	106
Anexo G. Método de deducción para la ecuación lineal de regresión, Weibull	107
Anexo H. Ejemplo 2: Base de datos compresor de gas natural	110
Anexo I. Base de datos para el ejemplo 1	118
Anexo J. Base de datos para el ejemplo 2	119

RESUMEN

TÍTULO: TÉCNICA PARA IMPLEMENTAR LA CURVA DE PROBABILIDAD DE FALLA (P-F) MEDIANTE LA PREDICTIVE MAINTENANCE TOOLBOX DE MATLAB *

AUTOR: CAMILA ALEJANDRA GRANADOS BAYONA, HÉCTOR DANIEL PÉREZ BERNAL**

PALABRAS CLAVE: TÉCNICA, MANTENIMIENTO PREDICTIVO, DISTRIBUCIÓN WEIBULL, CURVAS DE PROBABILIDAD DE FALLA (P-F), PREDICTIVE MAINTENANCE TOOLBOX DE MATLAB, FALLA POTENCIAL, FALLA OPERATIVA Y FALLA FUNCIONAL

DESCRIPCIÓN:

El siguiente proyecto de investigación detalla el proceso de diseño y simulación de una técnica para la implementación en la industria de las Curvas de Probabilidad de Falla (P-F), mediante la Predictive Maintenance Toolbox De Matlab, llevando a cabo un proceso bibliométrico referente a los trabajos de F. Stanley Nowlan Y Howard F. Heap, John Moubray y finalmente Douglass Plunckkette, que pueda ser utilizada en diversas máquinas con extensión a otros equipos; para el desarrollo de esta se realizó un estudio exhaustivo de las diferentes alternativas de software a utilizar y sus características.

Se estableció un flujo de trabajo que permitió definir parámetros de degradación o porcentajes de confiabilidad y tiempo modelados bajo un concepto estadístico con la herramienta de distribución de Weibull, también se definen unos requerimientos de diseño, ejecución y condiciones para la simulación. El modelado y validación de la técnica, se realizó con herramientas computacionales, en este caso la Predictive Maintenance Toolbox de Matlab y Microsoft Excel.

Finalmente se logra por primera vez fuera del contexto educativo la construcción de la curva de probabilidad de falla, aportando una innovación en la industria y el sector de mantenimiento ya que se puede ejecutar en su entorno laboral, aplicando monitoreo del punto de falla potencial usando datos de condición que permiten determinar el intervalo (P-F); a su vez, el proyecto da pie a futuras investigaciones sobre la técnica y evolución de esta.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Ingeniería mecánica. Director: Alberto David Pertuz Comas Doctor ingeniería mecánica

ABSTRACT

TITLE: TECHNIQUE TO IMPLEMENT THE PROBABILITY OF FAILURE (P-F) CURVE USING THE MATLAB* PREDICTIVE MAINTENANCE TOOLBOX *

AUTHOR: CAMILA ALEJANDRA GRANADOS BAYONA, HÉCTOR DANIEL PÉREZ BERNAL **

KEY WORDS: TECHNICAL, PREDICTIVE MAINTENANCE, WEIBULL DISTRIBUTION, PROBABILITY OF FAILURE (P-F) CURVES, PREDICTIVE MAINTENANCE TOOLBOX DE MATLAB, POTENTIAL FAILURE, OPERATIONAL FAILURE AND FUNCTIONAL FAILURE

DESCRIPTION:

The following research project details the process of design and simulation of a technique for the implementation in the industry of the Fault Probability Curves (P-F), using the Predictive Maintenance Toolbox Matlab, carrying out a bibliometric process referring to the works of F. Stanley Nowlan and Howard F. Heap, John Moubray and finally Douglass Plunckette, which can be used in various machines with extension to other equipment; for the development of this was carried out an exhaustive study of the different software alternatives to use and their characteristics.

A workflow was established that allowed to define parameters of degradation or percentages of reliability and time modeled under a statistical concept with the Weibull distribution tool, also defined requirements of design, execution and conditions for the simulation. The modeling and validation of the technique was performed with computational tools, in this case the Predictive Maintenance Toolbox of Matlab and Microsoft Excel.

Finally, it is achieved for the first time outside the educational context the construction of the fault probability curve, providing an innovation in the industry and the maintenance sector since it can be executed in its working environment, applying monitoring of the potential failure point using condition data that allow determining the interval (P-F); in turn, the project gives rise to future research on the technique and evolution of the same.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanics. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: Alberto David Pertuz Comas Doctor Mechanical Engineering

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Indiscutiblemente con el paso del tiempo, la humanidad ha desarrollado diferentes industrias para su constante crecimiento y evolución, estas a su vez, se conforman por diversos equipos o máquinas de cada vez mayor volumen, que requieren un cuidado y constante mantenimiento, aumentando de este modo su tiempo de operación o vida útil.

Para toda acción de mantenimiento, se hace indispensable conocer a detalle las posibles fallas potenciales de los equipos, reduciendo la incertidumbre a la avería. Una de las metodologías que satisface esta necesidad es el mantenimiento basado en la condición (RCM), útil para determinar, monitorear y priorizar los activos de mayor valor de una empresa, facilitando la toma de decisiones, basándose en un contexto donde se recogen diferentes datos operacionales, ambientales o de control, del mismo modo, los equipos categorizados como críticos, en restauración programada y el mantenimiento bajo ciertas condiciones, serán normalmente el objetivo de la extensión de la vida útil¹.

La herramienta base a utilizar para cumplir este propósito, son las curvas de probabilidad de falla (P-F), se propone una técnica para la implementación de estas mediante la Predictive Maintenance Toolbox de Matlab, que pueda ser utilizada en diversos equipos, máquinas o campos del sector industrial y a su vez aporte al mejoramiento en el área de mantenimiento.

¹ OCHELLA, Sunday, et al. Adopting machine learning and condition monitoring P-F curves in determining and prioritizing high-value assets for life extension. En: Expert Systems with Applications. ScienceDirect. [base de datos en línea]. 2021, vol. 176. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417421003389>

2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Las curvas de probabilidad de falla (P-F), brindan un enfoque diferente de abordar el mantenimiento predictivo, pero, analizado únicamente desde la perspectiva académica, buscando un beneficio para extender la vida útil de los equipos, máquinas o plantas, a su vez, mejorando el área de mantenimiento. De igual forma, se requiere el soporte de la Predictive Maintenance Toolbox de Matlab que permite gestionar datos de sensores, diseñar indicadores de condición y estimar la vida útil restante (RUL) de una máquina, incluyendo análisis estadísticos, espectrales y de series temporales.

La industria invierte recursos y esfuerzos para emprender el camino de la mejora continua, al hacer este tipo de investigaciones se logra el desarrollo de nuevas técnicas, como el uso de esta herramienta propuesta, alcanzando una innovación que aporta múltiples beneficios y mejoras a la producción en las empresas y a su vez disminuyendo costos de equipos. Al alargar la vida útil de los activos, se reduce el consumo de recursos e insumos, que en muchas industrias provocan daños ambientales y ecológicos.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer una técnica para la implementación de la curva de probabilidad de falla (P-F), mediante la Predictive Maintenance Toolbox de Matlab, que pueda ser utilizada en diversas máquinas y extensible a otros equipos, a su vez, aporta al mejoramiento en el área de mantenimiento.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio bibliométrico, utilizando la herramienta computacional VOSviewer para recabar información referente a las curvas de probabilidad de falla (P-F) y el software Predictive Maintenance Toolbox de Matlab.
- Establecer los parámetros de degradación de probabilidad y tiempos de falla de los equipos, usando la desviación estándar, histograma y la función de probabilidad de falla $f(t)$ respectivamente, para graficar la curva P-F y encontrar los tiempos de intervención.
- Modelar y validar computacionalmente los parámetros de degradación de probabilidad y tiempos de falla, usando el software Predictive Maintenance Toolbox de Matlab, para construir la curva de probabilidad de falla (P-F), que permita encontrar a la industria los tiempos de ejecución de la gestión de mantenimiento.

4. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Actualmente las empresas buscan tener el mayor provecho de sus activos, buscando siempre ser altamente competitivos, asumiendo el constante cambio y evolución de la industria moderna; el conocimiento técnico, científico y conceptos como la confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, facilitan la toma de decisiones del personal de mantenimiento, estos criterios forman las bases del presente proyecto de investigación, propiciando la optimización de procesos donde se pueda predecir el punto potencial de falla, buscando que se aplique de manera más efectiva la curva de probabilidad de falla en equipos o máquinas disponibles.

Las gestiones integrales de mantenimiento buscan garantizar al cliente interno o externo la disponibilidad de los activos fijos; la aplicación de la técnica propuesta contribuye a los requerimientos de los usuarios con niveles de calidad y tiempo solicitados, en el momento más oportuno, al menor costo posible y con los mayores índices de productividad, rentabilidad y competitividad.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

La curva P-F es una representación gráfica del comportamiento de un activo, desde su entrada en servicio hasta el momento que presenta una falla que le impide seguir funcionando, con el paso de los años esta herramienta es de referencia obligada al calcular la frecuencia de inspección para la implementación de un programa de mantenimiento basado en la confiabilidad, dando paso a diversos enfoques y objetos de estudio. Es de destacar que a nivel local y nacional no se encontraron trabajos en el ámbito de la investigación, por lo tanto, se utilizó un libro, un artículo, una tesis y un catálogo de procedencia internacional.

En el libro ROM 0.0², Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias, parte 1, basa su contenido en la descripción y características de los factores de proyectos, sin embargo, el capítulo 7 dirigido a la probabilidad de falla y parada operativa, el autor recomienda el uso de la curva de estados (Estado del activo vs tiempo) para evaluar el conjunto de posibles fallas; en consecuencia, el diagrama muestra la probabilidad conjunta de fallo y el establecimiento de estrategias de conservación y reparación.

Por otro lado, Raquel Vergara Lazcano³ en su tesis de maestría, La Estadística en el Mantenimiento y Reemplazo Óptimo en el Control de Calidad, enseña un

² LOSADA, Miguel A. ROM 0.0: Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias, parte 1. [en línea]. 1 ed. España: Universidad de Granada, Ministerio de fomento, Madrid, 2001. [Citado el: 17 de enero de 2022]. Disponible en: <https://widispe.puertos.es/rom/storage/public/docROM/ROM%2000-01.pdf>

³ VERGARA LAZCANO, Raquel. La Estadística en el Mantenimiento y Reemplazo Óptimo en el Control de Calidad. [Documento digital]. Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias. México. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Febrero del 2014. [Citado el: 22 de enero de 2022]. Disponible en:

proyecto que tiene como objetivo general presentar y realizar los análisis estadísticos correspondientes a los tiempos falla de un sistema con uno o más componentes, para poder realizar una adecuada planeación de los tiempos en los cuales se debe efectuar el mantenimiento preventivo de los componentes del sistema. Para su metodología el autor aplica métodos de distribución exponencial, normal, Weibull y logarítmica.

Figura 1. Portada libro ROM 0.0.



Fuente. LOSADA, Miguel A. ROM 0.0: Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias, parte 1. [en línea]. 1 ed. España: Universidad de Granada, Ministerio de fomento, Madrid, 2001. [Citado el: 17 de enero de 2022]. Disponible en: <https://widispe.puertos.es/rom/storage/public/docROM/ROM%2000-01.pdf>

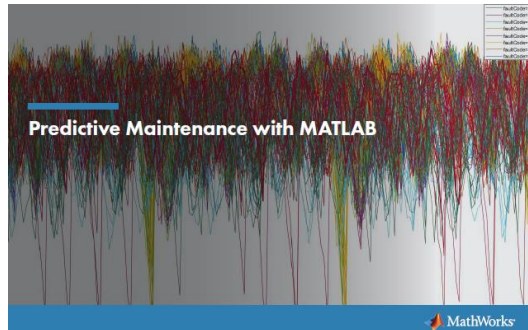
La corporación The MathWorks, Inc, publica el libro electrónico Predictive Maintenance with MATLAB⁴, exponiendo la Predictive Maintenance Toolbox, herramienta que puede estimar el tiempo de falla de una máquina, al usar modelos de supervivencia, similitud y basados en tendencias para predecir el

http://mat.izt.uam.mx/mcmai/documentos/tesis/Gen.110/R_AQUELVERGARA_LAZCANO.pdf

⁴ THE MATHWORKS, Inc. Introduction to Predictive Maintenance with MATLAB. [base de datos en línea]. 2019. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/ebook/gated/predictive-maintenance-ebook-all-chapters.pdf>

RUL; la herramienta tiene como estrategias el mantenimiento reactivo, preventivo y predictivo.

Figura 2. Portada libro electrónico Predictive Maintenance with MATLAB.



Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Mantenimiento predictivo con Matlab. [base de datos en línea]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/campaigns/offers/predictive-maintenance-withmatlab.htm>

La revista Elsevier publica el artículo Adopting machine learning and condition monitoring P-F curves in determining and prioritizing high-value assets for life extension⁵, presentando una técnica para adoptar las curvas P-F de monitorización del estado, determinando y priorizando los activos de alto valor para los tratamientos de extensión de la vida útil cuando llegan al final de esta. La técnica aprovecha el uso del mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM), se aplica el índice factor de intervalo de fallo potencial (PFIF) para cada equipo sirviendo como indicador de salud; el autor comprueba empíricamente la propuesta en los conjuntos de datos de simulación del sistema modular de autopropulsión comercial de la NASA.

⁵ OCHELLA, Sunday, et al. Adopting machine learning and condition monitoring P-F curves in determining and prioritizing high-value assets for life extension. En: Expert Systems with Applications. ScienceDirect. [base de datos en línea]. 2021, vol. 176. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417421003389>

Este artículo en cuanto aporté a nuestro proyecto de investigación, nos plantea un punto referente al implementar una técnica relacionada con las curvas de probabilidad de falla, brindándonos aportes objetivos al implementar sensores para la toma de datos y la utilización del software Matlab como herramienta de interfaz. Por último, refiere algunas posibles mejoras de la propuesta ya planteada.

5.2. REFERENTES TEÓRICOS

Para formar un referente de la línea investigativa asociada al caso en estudio, se establecieron los lineamientos convenientes para el entendimiento y ejecución de los objetivos formulados, bajo este criterio, se presentan las respectivas bases teóricas del proyecto propuesto.

5.2.1. Técnica

“Actividad o conjunto de actividades basados en la aplicación práctica de los métodos y de los conocimientos relativos a las diversas ciencias, en especial cuando supone la utilización de máquinas o la aplicación de métodos específicos”⁶.

5.2.2. Mantenimiento

“Es la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y gerenciales durante el ciclo de vida de un ítem con el fin de mantenerlo, o restaurarlo, aun estado en el cual pueda desempeñar la función requerida”⁷.

Existen diferentes tipos de metodologías de mantenimiento, aplicables en diferentes campos según algunos criterios, como costos, criticidad, calidad, etc. Las más relevantes son: Mantenimiento preventivo, Mantenimiento basado en la

⁶ OXFORD LANGUAGES. Técnico, ca. [sitio web]. 2022. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://languages.oup.com/google-dictionary-es/>

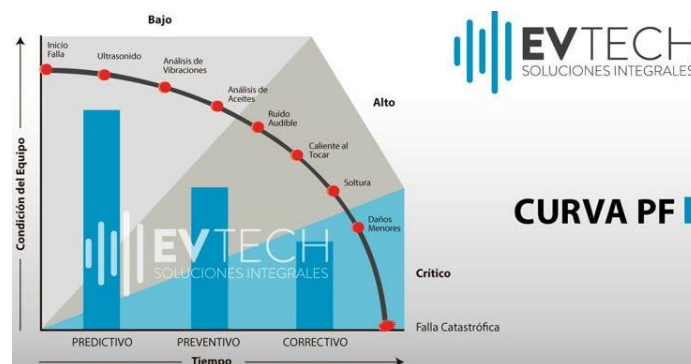
⁷ ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. Mantenimiento Terminología del mantenimiento. Requisitos. UNE EN 13306. [en línea]. Madrid, España: 2018.

condición, Mantenimiento predictivo, Mantenimiento correctivo, Reliability Centred Maintenance (RCM)

5.2.3. Curva de probabilidad de falla (P-F)

“La curva P-F es un modelo gráfico para visualizar la condición de un activo respecto al tiempo como referencia en programas de mantenimiento centrado en fiabilidad (RCM) y (PdM)”⁸. Entonces podemos afirmar que ilustra el comportamiento de un equipo, máquina o componente, desde su entrada en servicio hasta el momento que presenta una falla que le impide seguir funcionando; en la figura 6 el eje X representa el tiempo de vida del equipo, y en el eje Y representa la condición de este.

Figura 3. Curva P-F, EVTECH.



Fuente. EVTECH. La curva PF Mantenimiento Centrado en Fiabilidad RCM. [sitio web]. 25 de junio 2019. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://evtech.cl/la-curva-pf-mantenimiento-centrado-en-fiabilidad-rcm/>

5.2.4. Predictive Maintenance Toolbox de Matlab

Es una herramienta incorporada al software Matlab, la cual permite el almacenamiento en la nube y sistemas de archivos distribuidos, etiqueta datos de

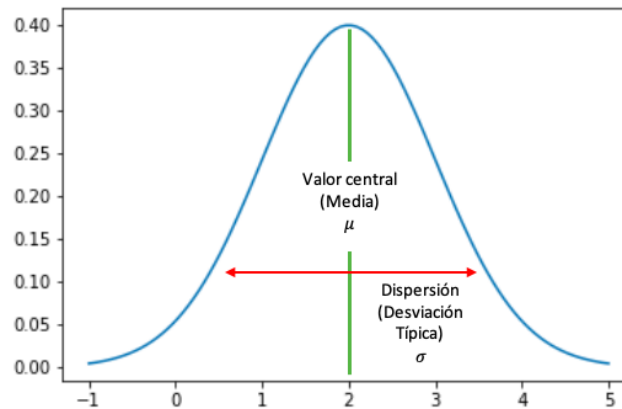
⁸ EVTECH. La curva PF Mantenimiento Centrado en Fiabilidad RCM. [sitio web]. 25 de junio 2019. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://evtech.cl/la-curva-pf-mantenimiento-centrado-en-fiabilidad-rcm/>

fallas simuladas generados a partir de modelos de Simulink®⁹. La caja de herramientas incluye ejemplos de referencia para motores, cajas de engranajes, baterías y otras máquinas que se pueden reutilizar para desarrollar algoritmos de monitoreo de condición y mantenimiento predictivo personalizados.

5.2.5. Distribución normal

Es una distribución con forma de campana donde las desviaciones estándar sucesivas con respecto a la media establecen valores de referencia para estimar el porcentaje de observaciones de los datos¹⁰.

Figura 4. Curva distribución normal.



Fuente. ECONOMIPEDIA. Distribución normal. [sitio web]. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://economipedia.com/definiciones/distribucion-normal.html>

⁹ THE MATHWORKS, Inc. Predictive Maintenance Toolbox. [sitio web]. 2021. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/predmain/t/>

¹⁰ SOPORTE DE MINITAB. ¿Qué es la distribución normal? [sitio web]. [Citado el: 22 de enero de 2022]. Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/what-is-the-normal-distribution/>

6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La técnica por desarrollar consiste en una formulación para construir las curvas de probabilidad de falla (P-F) como un método predictivo utilizando técnicas basadas en confiabilidad. Nowlan, et al. (1978)¹¹ en su publicación Reliability Centered Maintenance, capítulo tres, nos refiere que todo programa basado en confiabilidad debe constar de cuatro tareas básicas y específicas, seleccionadas sobre la base de las características reales de confiabilidad del equipo que están diseñadas para protegerlo, esto con el fin de poder realizar el mantenimiento, dichas tareas son:

1. Inspección programada de un artículo a intervalos regulares para encontrar fallas potenciales
2. Reelaboración programada de un artículo en o antes de un límite de edad especificado
3. Descarte programado de un artículo (o una de sus partes) en o antes de algún límite de vida especificado
4. Inspección programada de un elemento de función oculta para encontrar fallas funcionales

El autor también define que las tres primeras tareas están dirigidos a prevenir fallas únicas, sin embargo, la cuarta previene fallas múltiples. Vale aclarar que las tareas de inspección generalmente se pueden realizar sin quitar el artículo de su posición instalada, pero las tareas de reelaboración y descarte generalmente requieren que el artículo se retire del equipo y se envíe a una base de mantenimiento principal.

¹¹ F.S. NOWLAN, et al. Reliability Centered Maintenance. [en línea]. United Airlines San Francisco, California, 29 diciembre 1978. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: [https://www.chemicalprocessing.com/assets/Media/MediaManager/Nowlan-Heap-Reliability-Centered-Maintenance-part1 .pdf](https://www.chemicalprocessing.com/assets/Media/MediaManager/Nowlan-Heap-Reliability-Centered-Maintenance-part1.pdf)

El desarrollo de un programa de mantenimiento programado consiste en determinar cuáles de estas cuatro tareas, si las hay, son aplicables y efectivas para un elemento determinado, la aplicabilidad depende de las características de falla del elemento, por lo tanto, una inspección de fallas potenciales puede ser aplicable solo si el elemento tiene características que hacen posible definir una condición de falla potencial. De manera similar, una tarea con límite de edad será aplicable solo si las fallas a las que se dirige la tarea están relacionadas con la edad.

La eficacia es una medida de los resultados de la tarea; el objetivo de la tarea, sin embargo, depende de las consecuencias de falla involucradas, una tarea propuesta puede parecer útil si promete reducir la tasa general de fallas, pero no podría considerarse efectiva si el propósito de aplicarla fuera evitar fallas funcionales por completo

Para las tareas de inspección, la distinción entre aplicabilidad y efectividad suele ser obvia: el artículo tiene o no características que hagan aplicable dicha tarea. Sin embargo, para las tareas con límite de edad, la distinción a veces se ve borrosa por la creencia intuitiva de que la tarea siempre es aplicable y, por lo tanto, también debe ser efectiva. En realidad, imponer un límite de edad a un artículo no garantiza en sí mismo que se reduzca su tasa de fallas, el problema en este caso no es si la tarea se puede hacer, sino si al hacerlo mejorará la confiabilidad¹².

¹² F.S. NOWLAN, et al. Reliability Centered Maintenance. Página 50. [en línea]. United Airlines San Francisco, California, 29 diciembre 1978. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.chemicalprocessing.com/assets/Media/MediaManager/Nowlan-Heap-Reliability-CenteredMaintenance-part1.pdf>

6.1. CURVA DE PROBABILIDAD DE FALLA (P-F) POR F. STANLEY NOWLAN Y HOWARD F. HEAP¹³

F. Stanley Nowlan y Howard F. Heap, fueron los pioneros al introdujeron por primera vez el concepto de curva de probabilidad de falla (P-F) como parte de su documento Reliability Centered Maintenance, publicado en diciembre de 1978, limitando la curva según tareas programadas en condición, usando como ejemplo una tarea condicional de una fisura visual como medida de la fatiga del metal.

6.1.1. Tareas programadas en condición

Son aquellas que requieren la eliminación o reparación de unidades individuales de un artículo "con la condición" de que no cumplan con el estándar requerido. Tales tareas están dirigidas a modos de falla específicos y se basan en la factibilidad de definir alguna evidencia física identificable de una resistencia reducida al tipo de falla en cuestión, cada unidad se inspecciona a intervalos regulares y permanece en servicio hasta que su resistencia a fallas cae por debajo de un nivel definido, es decir, hasta que se descubre una falla potencial. Dado que las tareas en condición discriminan entre unidades que requieren mantenimiento correctivo para prevenir una falla funcional y aquellas unidades que probablemente sobrevivirán a la siguiente inspección, permiten que todas las unidades del artículo alcancen la mayor parte de su vida útil.

Nowlan, et al (1978), afirma que la aplicabilidad de una tarea en condición depende en cierta medida tanto de la tecnología de mantenimiento como del diseño del equipo. Por ejemplo, se han desarrollado técnicas de boroscopio y radioisótopos para inspeccionar motores de turbina, pero estas técnicas son valiosas principalmente porque los motores se han diseñado para facilitar su uso.

¹³ F.S. NOWLAN, et al. Reliability Centered Maintenance. Página 50. [en línea]. United Airlines San Francisco, California, 29 diciembre 1978. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.chemicalprocessing.com/assets/Media/MediaManager/Nowlan-Heap-Reliability-CenteredMaintenance-part1.pdf>

Si las tareas condicionadas fueran universalmente aplicables, todas las posibilidades de falla podrían tratarse de esta manera, desafortunadamente, hay muchos tipos de fallas en las que el modo de falla no se entiende claramente, es impredecible o no da suficiente aviso para que las medidas preventivas sean efectivas. Hay tres criterios que deben cumplirse para que una tarea condicional sea aplicable:

1. Debe ser posible detectar una reducción de la resistencia a fallas para un modo de falla específico.
2. Debe ser posible definir una condición de falla potencial que pueda ser detectada por una tarea explícita.
3. Debe haber un intervalo de edad razonablemente consistente entre el momento de la falla potencial y el momento de la falla funcional.

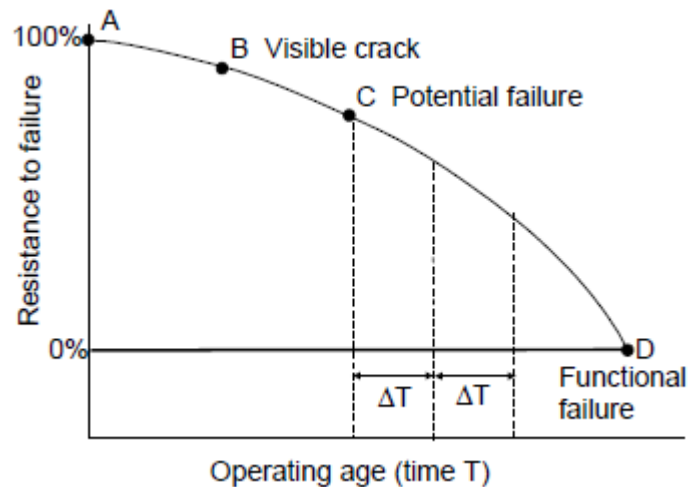
6.1.2. Ejemplo artículo con fisura visible como medida de la fatiga del metal

El autor explica el diagrama afirmando que en el punto (A) dicho artículo es más resistente a fallas cuando es nuevo, la resistencia decae constantemente con la edad, por ende, en el punto (B) está algo reducida cuando aparece una grieta. A partir de entonces, es posible monitorear el crecimiento de la grieta y definir un punto (C) de falla potencial con suficiente anticipación para permitir la remoción del elemento antes de que ocurra una falla funcional, punto (D), momento en el que el elemento debe repararse o reemplazarse, posteriormente estos puntos se conocerán como (P) y (F), respectivamente. Una vez que aparece una fisura, la resistencia a la falla cae más rápidamente; por lo tanto, se debe conocer la tasa de crecimiento de grietas en este elemento para establecer un intervalo de inspección ΔT en condición que controlará efectivamente este modo de falla.

Es importante aclarar que los datos y la curva es única para este fallo y toda la población de este artículo definirían un rango de edades de falla en lugar de una edad específica, por lo tanto, tanto la falla potencial definida como la frecuencia de las inspecciones dependen del objetivo de la tarea. Si una falla funcional tuviera

consecuencias para la seguridad, entonces el objetivo es prevenir todas esas fallas, en este caso, puede ser aplicable una tarea en condición, pero se considerará efectiva sólo si minimiza la probabilidad de una falla crítica, si la falla no involucra seguridad, entonces la efectividad se mide en términos económicos, es decir, la tarea es efectiva solo si es rentable, en el caso de consecuencias operativas, esto significa que el costo de encontrar y corregir fallas potenciales debe ser menor que el costo combinado de las consecuencias operativas más el costo de reparación de las unidades defectuosas.

Figura 5. Determinación del intervalo para la inspección en condición de un artículo sujeto a fatiga del metal



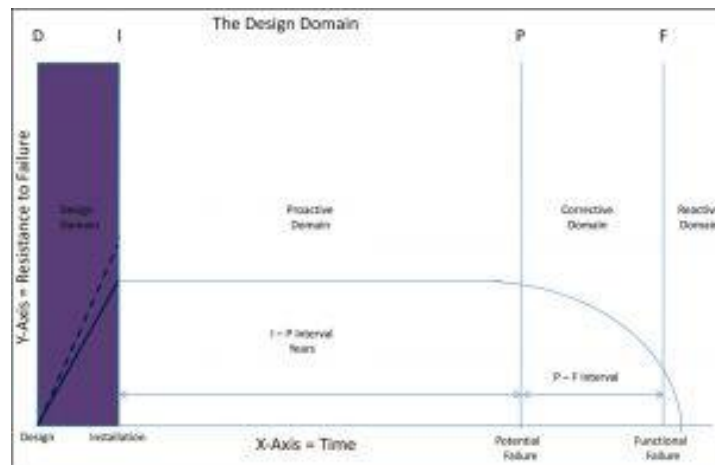
Fuente. F.S. NOWLAN, et al. Reliability Centered Maintenance. [Documento]. United Airlines San Francisco, California, 29 diciembre 1978. [Citado el: 11 de junio de 2022].

También es importante resaltar que John Moubray en su documento RCM II: Reliability Centered Maintenance publicado en 1997, aporta nuevas formas de predecir el punto (P), con ayuda de nuevas tecnologías.

6.2. CURVA DEL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS (D-I-P-F) POR DOUGLASS PLUNCKKETTE¹⁴

Posteriormente el señor Douglass Plunckkette hace un aporte significativo a la curva de probabilidad de falla en el documento Expanding La Curva, publicado en el 2006, presentándola como la curva del ciclo de vida de los activos (D-I-P-F) agregando dos etapas más y dividiendo la curva por dominios o zonas.

Figura 6. Dominio de diseño de la curva (D-I-P-F)



Fuente. RELIABILITYWEB.COM. Completing the Curve. [sitio web]. 25 de junio 2019. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://reliabilityweb.com/articles/entry/completing-the-curve>

6.2.1. Punto (D)

Lo primero que siempre debe considerar en términos del ciclo de vida de un activo es la confiabilidad inherente que espera que entregue el sistema, activo, componente o artículo. La confiabilidad inherente es el nivel de confiabilidad que entregará el artículo cuando está protegido por una estrategia de mantenimiento completa, que incluya tareas de mantenimiento preventivo (PM) y en condición.

¹⁴ RELIABILITYWEB.COM. Completing the Curve. [sitio web]. 25 de junio 2019. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://reliabilityweb.com/articles/entry/completing-the-curve>

Dicho esto, todo el mantenimiento del mundo no mejorará la confiabilidad de un sistema, activo o componente cuya confiabilidad inherente es deficiente.

¹⁵El punto D, debe observar de cerca su proceso de mejora de capital para asegurarse de que utiliza una combinación de herramientas que funcionan juntas para lograr una confiabilidad inherente fuerte o robusta, la línea punteada representa la comprensión del diseño para un nivel de confiabilidad más allá de las expectativas de desempeño. Esto incluye, pero no se limita a:

- RCM
- Análisis de modos y efectos de falla (FMEA)
- Diagramas de bloques de confiabilidad
- Acuerdos de proveedores selectos
- Documentos de requisitos
- Normas de diseño
- Jerarquía de equipos
- Análisis de criticidad

6.2.2. Punto (I)

Si bien no se puede enfatizar lo suficiente la importancia de usar herramientas y técnicas de confiabilidad en la fase de diseño de la curva (D-I-P-F), el Punto (I), para el dominio de la instalación si, el diseño más confiable puede arruinarse para siempre por una instalación mal ejecutada.

Generalmente de 10 empresas evaluadas, 8 no tienen estándares formales de instalaciones, 9 no incluyen técnicos mecánicos, eléctricos o de instrumentación y ninguno sabe si los trabajadores cuentan con la formación formal en oficios

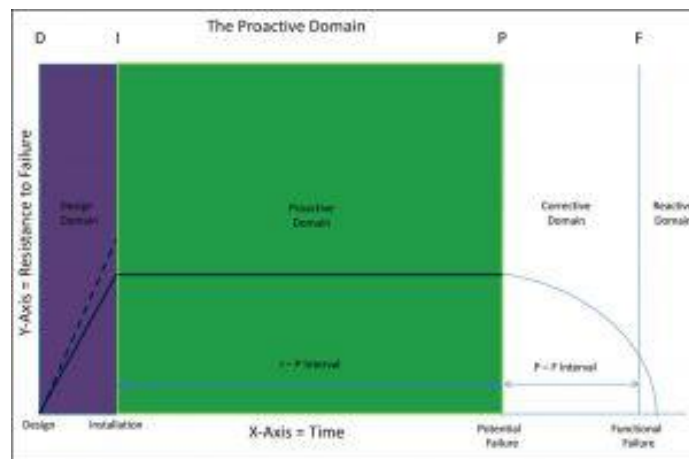
¹⁵ PLUCKNETTE, Douglas. Expandiendo la curva. Revista Uptime. [en línea]. junio/julio de 2006. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/416276351/Curva-P-F-docx>

especializados. Tampoco tenían idea si tenían las certificaciones adecuadas para instalar sistemas de cableado a prueba de explosiones.

Estos hechos solo mejorarán cuando las empresas reconozcan estas brechas y se aseguren de que su gente esté capacitada en el uso de herramientas de precisión y la importancia de seguir estándares de instalación detallados. El costo adicional de agregar herramientas y métodos de confiabilidad en su proceso de mejora de capital es de 1% a 3% por ciento en el mejor de los casos.

6.2.3. Dominio o zona proactiva

Figura 7. Dominio o zona proactiva



Fuente. RELIABILITYWEB.COM. Completing the Curve. [sitio web]. 25 de junio 2019. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://reliabilityweb.com/articles/entry/completing-the-curve>

En esta etapa es donde se aplica el plan de mantenimiento como RCM o se agregan herramientas, métodos y recursos de confiabilidad al proceso de mejora del activo. Esta lista de tareas incluye monitoreo continuo en condición, inspecciones de PdM, inspecciones de PM, tareas de cuidado del operador, tareas de lubricación y tareas de detección de fallas.

“Estas tareas proactivas de mantenimiento del equipo se realizan en un programa establecido para garantizar el máximo intervalo de (I-P)”¹⁶ La falta de identificación de las tareas, la finalización de las tareas o las malas prácticas de instalación reducen drásticamente el intervalo de (I-P).

6.2.4. Punto (P)

Nowlan y Heap citado por RELIABILITYWEB (2016)¹⁷ definieron la falla potencial punto (P) como: "Una condición física identificable que indica que una falla funcional es inminente". Esta condición física se puede detectar de muchas maneras, incluidas las tareas en condición (PdM), los sentidos humanos y la verificación de procesos.

Algunas cosas importantes para entender sobre el Punto P:

- El punto (P) NO es donde ocurrió la falla; es donde se detecta por primera vez, esta causa es el modo de falla.
- En muchos casos, el punto (P) se puede eliminar. Si puede identificar el modo de falla que resultó en una condición física identificable, generalmente puede eliminar ese modo de falla con buenas prácticas de instalación y mantenimiento.
- El punto (P) puede y se moverá hacia arriba y hacia abajo en la curva (P-F), según la tarea que se utilice para identificar la presencia de una condición física. La mejor tarea para identificar el punto (P) es aquella que sea rentable y consistente en la detección temprana del mismo.
- No es raro usar múltiples tareas y múltiples condiciones físicas para garantizar que se detecte el punto P.

¹⁶ PLUCKNETTE, Douglas. Expandiendo la curva. Revista Uptime. [en línea]. junio/julio de 2006. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/416276351/Curva-P-F-docx>

¹⁷ RELIABILITYWEB.COM. Completing the Curve. [sitio web]. 25 de junio 2019. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://reliabilityweb.com/articles/entry/completing-the-curve>

- El punto (P) NO viene con un límite de tiempo conocido. Para ser claros, una vez que se detecta el punto (P), se desconoce el tiempo que tarda el elemento en fallar funcionalmente. Lo que sí sabe es que una vez que se ha detectado el Punto P, la falla es inminente y no se evitará sin intervención.

6.2.5. Dominio o zona correctiva o síntomas

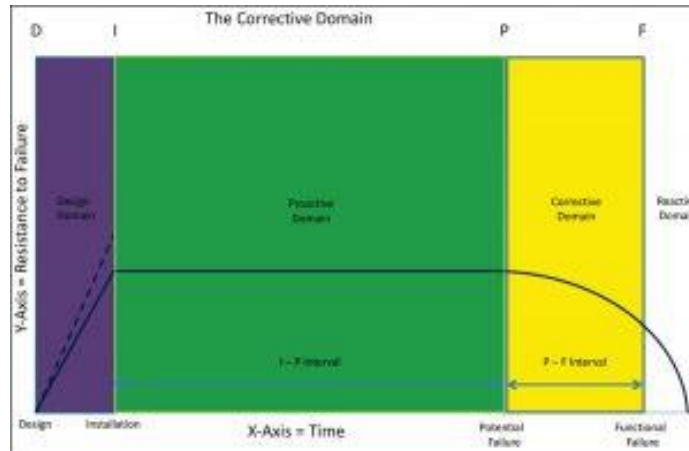
También conocido como el intervalo (P-F), el objetivo del dominio correctivo es planificar, programar y ejecutar la reparación o el reemplazo del elemento detectado por el punto (P) antes de que ocurra una falla funcional.¹⁸

Cosas importantes para entender sobre el intervalo (P-F):

- Cada componente y pieza de su planta se ajusta a la curva (P-F). La diferencia entre un componente o pieza y el siguiente es el tiempo que se tarda en ir del punto (P) al punto (F). Según el componente, la pieza y el modo de falla, el intervalo de (P-F) puede ser de meses o una fracción de segundo.
- El intervalo (P-F) es fundamental para ayudarlo a tomar decisiones acertadas sobre tareas según la condición. El componente/parte y el modo de falla deben tener un intervalo (P-F) útil y ser rentables para que una tarea en condición se considere aplicable y efectiva.
- El intervalo para una tarea en condición debe ser la mitad del intervalo (P-F) o menos para garantizar que siempre se detecte la condición física identificable.

¹⁸ PLUCKNETTE, Douglas. Expandiendo la curva. Revista Uptime. [en línea]. junio/julio de 2006. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/416276351/Curva-P-F-docx>

Figura 8. Dominio o zona correctiva o síntomas



Fuente. RELIABILITYWEB.COM. Completing the Curve. [sitio web]. 25 de junio 2019. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://reliabilityweb.com/articles/entry/completing-the-curve>

Una vez que haya detectado el punto (P), debe planificar y programar inmediatamente la reparación o el reemplazo del artículo lo antes posible ya que la falla es siempre inminente.

6.2.6. Punto (F)

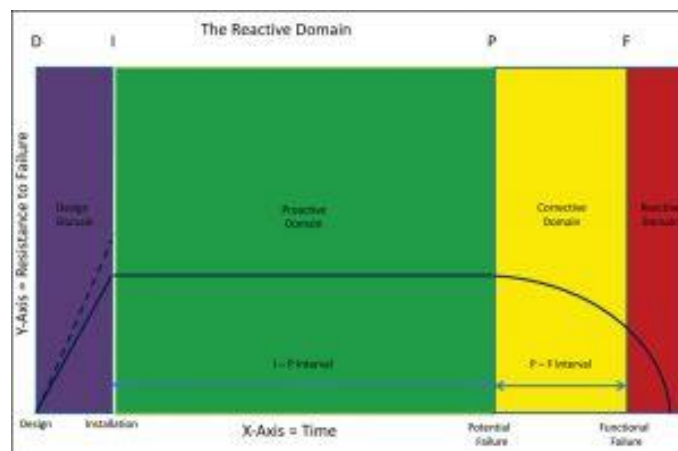
El punto (F) en la curva (D-I-P-F) designa el punto en el que el elemento falla funcionalmente. Nowlan y Heap citado por RELIABILITYWEB (2016)¹⁹ definieron la falla funcional como: "La falla de un elemento para realizar sus acciones normales o características dentro de los límites especificados". En términos simples, el punto (F) o falla funcional es el punto en el que su componente ya no puede funcionar con un estándar de rendimiento específico.

¹⁹ RELIABILITYWEB.COM. Completing the Curve. [sitio web]. 25 de junio 2019. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://reliabilityweb.com/articles/entry/completing-the-curve>

6.2.7. Dominio o zona reactiva

El lugar más costoso y peligroso para que una empresa realice la mayor parte de su trabajo de mantenimiento es el dominio reactivo, porque ya se han producido daños en los componentes y equipos secundarios, lo que multiplica el costo de reparación más de cinco veces en comparación con completarlo en el dominio correctivo.²⁰

Figura 9. Dominio o zona reactiva



Fuente. RELIABILITYWEB.COM. Completing the Curve. [sitio web]. 25 de junio 2019. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://reliabilityweb.com/articles/entry/completing-the-curve>

6.3. INDICADOR DE RIESGO Y VIDA ÚTIL REMANENTE (RUL)

Al igual que se ha hecho profundización sobre las curvas de probabilidad de falla y todo lo tratado anteriormente en este capítulo, un tema a la par que ha ido avanzando es la vida útil remanente (RUL), que permitirá la modelación en la Toolbox del software Matlab por lo que es de utilidad tener la mayor información y la más actualizada sobre este tema; esto funcionara para adquirir un indicador de

²⁰ PLUCKNETTE, Douglas. Expandiendo la curva. Revista Uptime. [en línea]. junio/julio de 2006. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/416276351/Curva-P-F-docx>

riesgo. Es de aclarar que la curva (P-F) no indica condición de riesgo, sino una estimación estadística de cuando puede existir un intervalo para empezar a realizar intervención de mantenimiento.

El artículo Remaining Useful Life Estimation In Prognostics Using Deep convolution Neural Networks publicado para la conferencia internacional sobre pronósticos y gestión de riesgo (PHM08)²¹ del 2008, habla sobre “el pronóstico del sistema y la gestión de riesgo (PHM) que dependen de un conocimiento previo suficiente del proceso de degradación de ciertos componentes críticos para poder predecir la vida útil remanente (RUL)”²². Las nuevas tecnologías ahora buscan satisfacer la creciente demanda industrial de eficiencia y confiabilidad, por lo que hablar sobre tecnologías inteligentes de pronóstico y gestión de riesgo (PHM) se vuelven de suma importancia a causa de que cuentan con tres enfoques, basados en modelos, en datos e híbridos.

A sí mismo, para la misma conferencia se presente el artículo A Similarity-Based Prognostics Approach For Remaining Useful Life Estimation Of Engineered Systems²³, el cual hace referencia a la estimaciones de la vida útil remanente (RUL) que atañen al tema aquí planteado, asumiendo “El enfoque basado en datos para la estimación de RUL que normalmente se basa en la disponibilidad de datos de funcionamiento hasta el fallo, en función de los cuales se puede estimar el RUL”²⁴ y que usa una metodología de procedimientos donde se hace evaluación del rendimiento y estimación de RUL.

²¹ LI, Xiang, et al. Remaining Useful Life Estimation in Prognostics Using Deep Convolution Neural Networks. [Documento digital]. 2006. [Citado el: 13 de julio de 2022].

²² LI, Xiang, et al. Remaining Useful Life Estimation in Prognostics Using Deep Convolution Neural Networks. [Documento digital]. 2006. [Citado el: 13 de julio de 2022].

²³ WANG, Tianyi, et al. A Similarity-Based Prognostics Approach for Remaining Useful Life Estimation of Engineered Systems. [Documento digital]. 2006. [Citado el: 13 de julio de 2022].

²⁴ WANG, Tianyi, et al. A Similarity-Based Prognostics Approach for Remaining Useful Life Estimation of Engineered Systems. [Documento digital]. 2006. [Citado el: 13 de julio de 2022].

Es importante destacar que en el artículo se enfatiza que los métodos de extrapolación de curvas basados en el resultado de la regresión logística son menos precisos, y este además habla de que será de utilidad derivar primero múltiples modelos de degradación representativos de los activos tratados que contienen datos para cada ciclo de cada unidad, esto permitirá encontrar modelos con patrones de degradación similares y utilizarlos como base para la estimación del RUL.

Para este artículo no se identifican modos de falla cuantificables debido a que se extiende en un amplio rango y dificulta el proceso para adquirir el indicador de riesgo en el que está enfocado. Sin embargo, este paso es de vital importancia para poder construir una curva de probabilidad de falla.

7. DESARROLLO DE LA TÉCNICA

Es necesario definir una línea de diseño, esta técnica seguirá las definiciones de Douglass Plunckkette, haciendo énfasis que radica del trabajo original F. Stanley Nowlan & Howard F. Heap (1978) y los aportes posteriores de John Moubray (1997); sin embargo, nuestro aporte será el diseño de una técnica que permita la construcción de la curva (P-F). En recopilación, asumimos para este proyecto de investigación una serie de conceptos.

7.1. CONCEPTOS PARA TENER EN CUENTA EN EL DISEÑO DE LA TÉCNICA

Con la propuesta establecida para guiar la metodología de trabajo, adoptamos los criterios que deben cumplirse para que una tarea condicional sea aplicable como lo describen Nowlan & Howard F. Heap (1978), a su vez, establecemos que una falla es un proceso más no es un evento, “es simplemente una condición insatisfactoria”²⁵

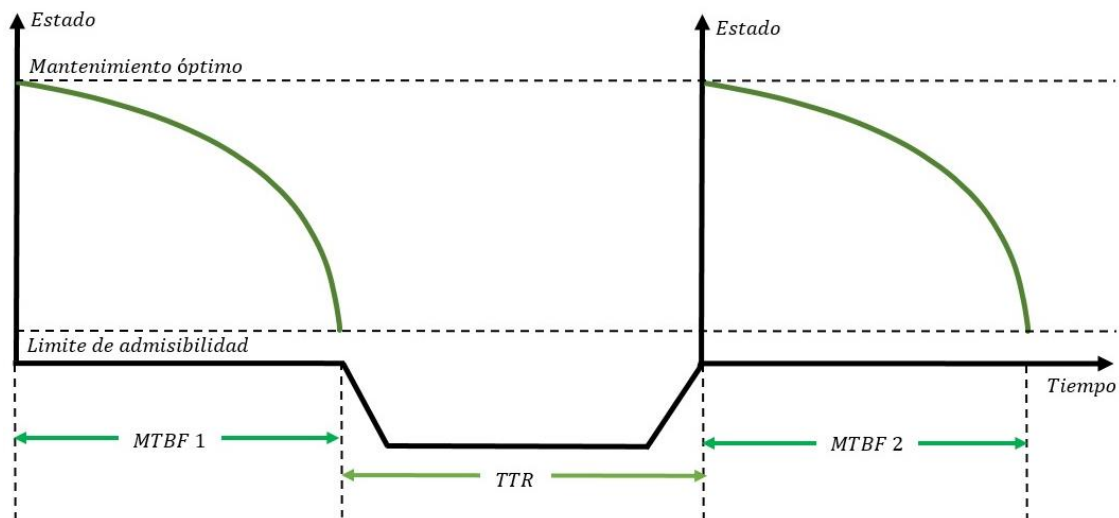
La curva (P-F), es una representación gráfica que hasta el momento no se ha podido representar matemáticamente, sin embargo, este trabajo investigativo hace realidad esta posibilidad y da pie a nuevas innovaciones; la labor del mantenedor es analizar, interpretar y priorizar la seguridad, según estos valores o síntomas. Es construida para modos de falla, por ende, una inspección de fallas potenciales puede ser aplicable solo si el elemento tiene características que hacen posible definir una condición de falla potencial.

²⁵ F.S. NOWLAN, et al. Reliability Centered Maintenance. [en línea]. United Airlines San Francisco, California, 29 diciembre 1978. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.chemicalprocessing.com/assets/Media/MediaManager/Nowlan-Heap-Reliability-CenteredMaintenancepart1.pdf>

La curva es única a cada modo de falla y según las condiciones de operación, no es genérica, por lo que servirá exclusivamente para plasmar una estadística de mejora en el siguiente activo que estará en operación, como fue mencionado en el capítulo 6.3, constituye a un enfoque basado en datos, ya que puede modelar las características de degradación en función de datos históricos de sensores; al momento en que se haga el respectivo cambio del mismo, se tendrá que construir una nueva curva, a pesar de ser la misma pieza, el mismo modo de falla, o las mismas condiciones de operación, ya que existe la posibilidad de que haya un cambio dentro de la vida del activo, además este presenta síntomas temporales cuantificables, prediciendo la ocurrencia de una falla, pero es significativamente más difícil decir cuándo ocurrirá. En otras palabras, al mantenedor no le interesa saber cuándo falla el activo, si no cuando debe intervenirlo, del mismo modo representa el estado final de una falla y no la vida útil del mismo.

Figura 10. Curva P-F y de distribución de tiempo

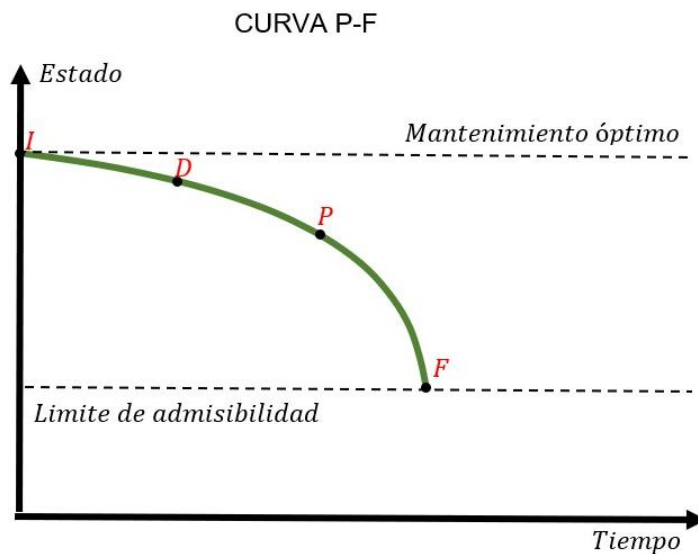
COMPORTAMIENTO CICLICO DE LA CURVA P-F



Fuente. Elaboración propia

La norma ISO 14224²⁶ describe los tiempos de mantenimiento, que constan del tiempo entre falla seguido del tiempo total de reparación, este proceso tiene un comportamiento cíclico, a su vez varían si se realiza mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo, etc.

Figura 11. Curva de probabilidad de falla



Fuente. Elaboración propia

En este orden de ideas establecemos los siguientes criterios para tener en cuenta:

- **Punto potencial de falla (P):** es el punto donde se presenta un síntoma el cual indica la presencia de una falla inminente. Para definir correctamente este punto, se debe definir previamente unos límites permisibles, esto se realiza asumiendo el modo de falla que se estudia y el tipo de método con el cual se está haciendo el monitoreo.

²⁶ PUBLICACIÓN DE ESTÁNDARES BSI. Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural — recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos, ISO 14224. [en línea]. Estándar Británico: 2016. Página 42.

- **Falla funcional (F):** punto donde se pierde la función dentro del contexto operacional, no significa que el activo se encuentre dañado por completo, pero se asume que después de este punto, entremos en el dominio o zona reactiva donde se puede ocasionar daños en los componentes y equipos secundarios, lo que multiplica el costo de reparación.
- **Intervalo (I-P):** también conocido como el dominio o zona proactiva, es la unidad que transcurre entre los puntos (I) y (P), allí se aplica el plan de mantenimiento, según el modo de falla, y el método de monitoreo de condición a utilizar.
- **Intervalo (P-F):** también conocido como el dominio o zona correctiva, es la unidad que transcurrió entre los puntos (P) y (F), donde se tiene la oportunidad de realiza el mantenimiento, el cual en la práctica no necesariamente inicia cuando surge el punto (P) (se permite la toma de decisiones adecuada al contexto), sin embargo, esta revisión debe realizarse mínimamente a la mitad de este periodo. Este intervalo depende de:²⁷ Seguridad y medio ambiente, costo de mantenimiento, criticidad, calidad, producción, todo en su respectivo orden.
- **Función del activo:** “Actividad particular que realiza una persona o una cosa dentro de un sistema de elementos, personas, relaciones, etc., con un fin determinado”²⁸
- **Síntomas temporales: Síntomas,** “Indicio o señal de una cosa que está ocurriendo o que va a ocurrir”. **Temporales** “Que dura relativamente poco tiempo”²⁹

²⁷ YOUTUBE. Curva P-F del Mantenimiento – BIMAN. [sitio web]. 2019. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=n-dkmWAqNsw>

²⁸ OXFORD LANGUAGES. Síntomas. [sitio web]. 2022. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://languages.oup.com/go-ogle-dictionary-es/>

- **Detectabilidad:** “Capacidad de una lesión de poder ser puesta de manifiesto en su estudio mediante técnicas o métodos”³⁰
- **Consecuencias:** “Hecho o acontecimiento derivado o que resulta inevitable y forzosamente de otro”³¹

7.2. FLUJO DE TRABAJO

Ya establecida la metodología y los conceptos que se usarán en el desarrollo de la técnica se procede a constituir un modo para trabajar la técnica, por lo que es indispensable el flujo de trabajo a continuación planteado, puesto que indicará el paso a paso que deberá llevar el cliente o usuario que aplicará las curvas según sea su enfoque.

El desarrollo se constituye de manera robusta en dos grandes partes: el primero tiene que ver con todo lo que se describe a lo largo del eje “x”, referente al monitoreo dentro de la curva, reparaciones y el tiempo o unidades de frecuencia de falla como lo afirma Douglas Plucknette³². El segundo, en todo lo que va situado a lo largo del eje “y”, que tendrá que ver con el estado de degradación o indicadores de condición.

²⁹ OXFORD LANGUAGES. Sintomas. [sitio web]. 2022. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://languages.oup.com/go-ogle-dictionary-es/>

³⁰ CLÍNICA UNIVERSIDAD DE NAVARRA. Diccionario Médico, Detectabilidad. [sitio web]. 2020. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.cun.es/diccionariomedico/terminos/detectabilidad#:~:text=f.,estudio%20mediante%20t%C3%A9cnicas%20o%20m%C3%A9todos>

³¹ OXFORD LANGUAGES. Sintomas. [sitio web]. 2022. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://languages.oup.com/go-ogle-dictionary-es/>

³² PLUCKNETTE, Douglas. Expandiendo la curva. Revista Uptime. [en línea]. junio/julio de 2006. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/416276351/Curva-P-F-docx>

7.2.1. Eje X: Tiempo de frecuencia de falla

7.2.1.1 Adquirir datos

Para implementar de forma idónea la técnica se debe seleccionar el activo en estudio (este será dado o seleccionado por el usuario). De acuerdo al monitoreo ya realizado se obtienen datos de adquisición, que a su vez, el cliente deberá tener presente si cuenta con su respectivo historial de fallas, para hacer uso del mismo; esta información por lo general se obtiene del operario de la máquina, quien brinda los primeros datos en tiempo real, aunque en la mayoría de las situaciones esta data es adquirida por medio de equipos o sensores, los cuales recolectan valores de temperatura, presión, vibración, según sea el caso, modo de falla o condiciones de operación.

7.2.1.2 Identificación del modo de falla

Una máquina se conforma por múltiples sistemas y subsistemas, que a su vez tienen diferentes comportamientos según sus elementos. Dentro del análisis que se le deben hacer a estos subsistemas se hace necesario poder identificar el modo de falla correctamente, asumiendo que para cada modo de falla se debe construir una curva y para eso se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Dividir el equipo en sistemas y subsistemas. Es necesario hacer este procedimiento ya que la curva de probabilidad de falla solo es aplicable a modos de falla, por ende, se requiere de este paso para poder identificar los mismos.
- Identificar sus posibles modos de falla. Al tener identificado los subsistemas del equipo se pueden determinar modos de falla ya sea por datos históricos, o por manual de fabricante, del mismo modo se identifican los activos responsables de dicha situación.
- Identificar la metodología idónea para monitorear los modos de falla. De acuerdo con el plan de mantenimiento ejercido por el cliente que va a

aplicar la técnica y sus recursos, se selecciona el monitoreo que más se ajuste a cada situación.

7.2.1.3 Identificación de condición de operación, indicadores y límites permisibles

Con los datos categorizados, se debe definir unos límites permisibles según las condiciones de operación o indicadores. Por ejemplo, si el sensor u operario está adquiriendo señales de temperatura, se debe considerar un rango de temperatura óptima de trabajo, el cual tendrá un margen entre un valor máximo y un valor mínimo, dependiendo de las condiciones operativas. De esta forma se puede obtener el punto (P) de la curva en el momento que el activo se salga de los parámetros establecidos, conocido como señal de falla, de lo contrario se comporta como un dato histórico; ahora el punto (F), se consigue en el momento que el activo ya no esté en contexto de operación, adquiriendo a su vez el intervalo P-F.

7.2.1.4 Proceso de datos

Los datos deben ser clasificados según el tipo de falla o modo de falla, logrando así un filtrado de datos que darán paso a gráficas mucho más precisas, con datos mucho más relevantes que brinden mejor y mayor información, esto se logra con ayuda de los sensores utilizados (o de la manera en que el cliente obtenga sus datos); al tener los valores de estos, se deben categorizar como datos históricos, los cuales indican el funcionamiento del activo en donde no se encuentran anomalías dentro de la operación, o señales de falla que son aquellas las que indican cuando hay una operación anormal del activo, ya sea por fallas esporádicas, crónicas, o de impacto en la función, de estas últimas se pueden caracterizar como: incipientes, degradadas o críticas y con las cuales trabajaremos dentro de la curva de probabilidad.

Todo lo que se pretende mostrar en el procesamiento de datos relacionados al tiempo se observa en el eje “x” como lo muestra la Figura 10. Aunque no se restringe a esto únicamente ya que dependerá las unidades de frecuencia de fallo que se tengan.

7.2.2. Eje Y: Indicador de estado o porcentaje de confiabilidad.

Para poder ubicar y realizar una mejor gestión de tiempos de mantenimiento es necesario analizar con detenimiento los modos de falla y la confiabilidad que podamos extraer de los datos ya antes procesados, el indicador de confiabilidad guiará la medida de tiempo de vida útil del activo.

Para calcular la función confiabilidad, se optó por utilizar el método estadístico referente a la herramienta de distribución de Weibull, el cual consiste en adquirir una data que contiene los tiempos entre fallas o el MTBF (“acrónimo en inglés, y se refiere a una medición básica de confiabilidad para artículos que se pueden reparar”³³), organizándose de menor a mayor; esto dará pie para implementar la tabla de fiabilidad. Vale aclarar que se puede aplicar otros métodos estadísticos para el análisis del indicador de estado.

A pesar de que nuestro mayor interés es determinar la tabla de fiabilidad, dado que de allí empezamos a deducir hasta adquirir la función confiabilidad, la distribución de Weibull puede aportar otros datos que para nuestro usuario les podría ser de interés; para ello se debe comprender el método a profundidad descrito en el anexo G.

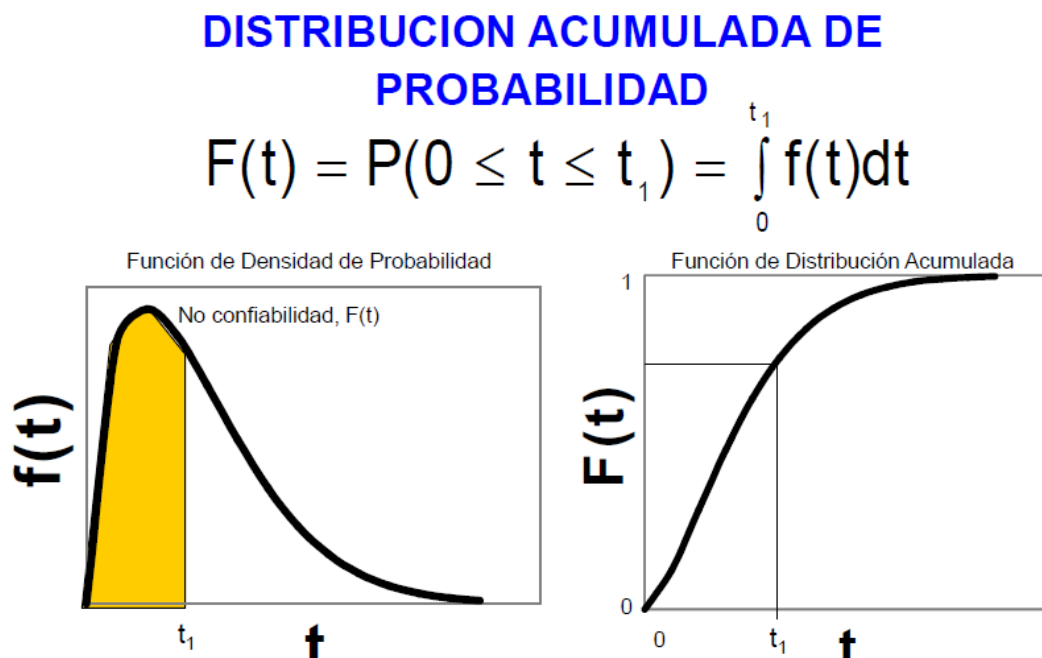
7.2.2.1. Tabla de fiabilidad

Al tener los tiempos entre falla de menor a mayor se puede aplicar la tabla de fiabilidad, que consiste en organizar los datos por periodos de tiempo o según sea

³³ Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [diapositivas], 165 diapositivas, color

el contexto o frecuencia operacional y deseo del cliente, pero teniendo en cuenta que entre mayor frecuencia se encontrará una mayor precisión en las gráficas. Se representa de forma gráfica apoyándose de un histograma como se ilustra en la figura 12, a la cual se le aplica una línea de tendencia para la obtención de la función de densidad de probabilidad $f(t)$.

Figura 12. Función de densidad de probabilidad y Función de distribución acumulada.



Fuente: Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [diapositivas], 165 diapositivas, color

A parte de obtener dicha función, con la figura 12 se logra determinar la media de los valores, lugar donde se halla el 50% de probabilidad de falla o 50% de confiabilidad, a su vez, se puede distribuir los valores del eje “x” del histograma de forma lineal para obtener el % de confiabilidad que sea de nuestro interés en la línea de tiempo, asumiendo que hacia la izquierda aumenta la confiabilidad y a la derecha disminuye, siendo inversamente proporcional a la probabilidad de falla.

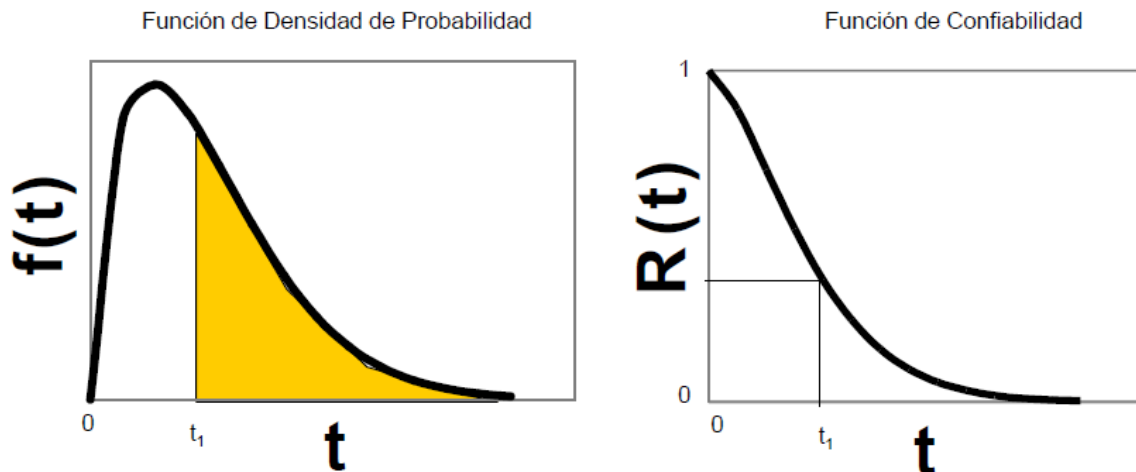
Media estimada; $m = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$; Ecuación 13

“La regla que asigna valores de frecuencia relativa o probabilidades a los valores de una variable se llama Distribución de Probabilidad o densidad de probabilidad”³⁴. A partir de allí se busca la función de distribución acumulada $F(t)$, asociada a la definición de que “Cuando la variable es tiempo de falla, esto representa la probabilidad de que una unidad falle antes del tiempo t_1 ”³⁵, dicha función se obtiene al integrar $f(t)$.

Figura 13. Función de densidad de probabilidad y función de confiabilidad.

DEFINICIÓN DE CONFIABILIDAD

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt$$



Fuente: Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [diapositivas], 165 diapositivas, color

³⁴ Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [diapositivas], 165 diapositivas, color

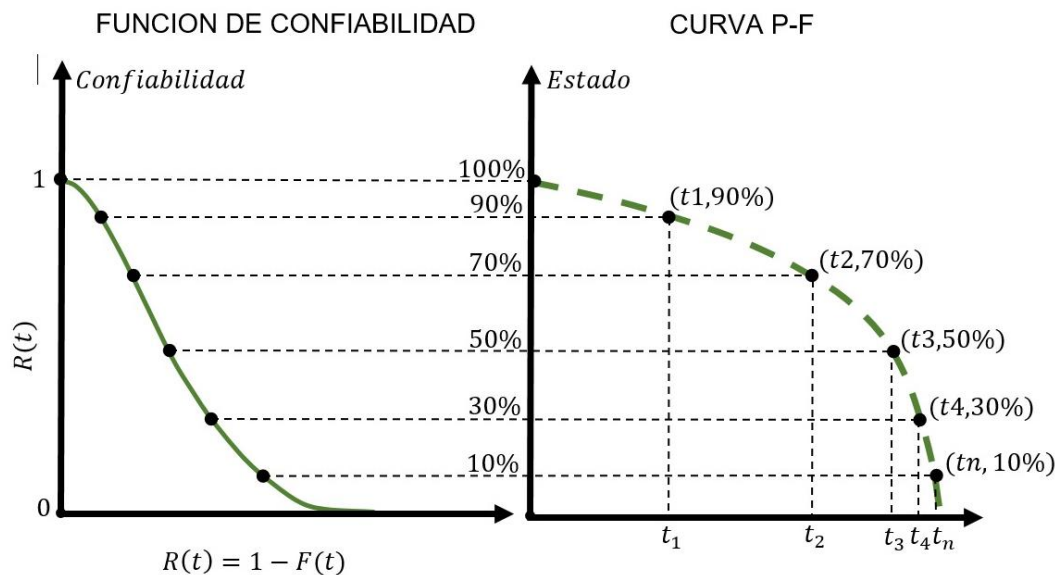
³⁵ Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [diapositivas], 165 diapositivas, color

A partir de allí se puede determinar la función de confiabilidad, tomando la confiabilidad como: “la probabilidad de que un sistema ejecute su función de intención sin fallar para un intervalo específico, bajo condiciones establecidas”³⁶. Se define también como la probabilidad de supervivencia o función de confiabilidad en un determinado tiempo, descrita con la siguiente fórmula:

$$R(t) = 1 - F(t); \text{ Ecuación 14}$$

Para concluir, la función de confiabilidad y el análisis realizado al histograma determinando la media y posteriormente la distribución de tiempo, logramos definir la confiabilidad para cualquier instante de tiempo, permitirá hacer un empalme con la curva de probabilidad de falla y hallar los valores que deberán ir a lo largo del eje “y”.

Figura 14. Fusión entre la curva de confiabilidad y la curva P-F



Fuente. Elaboración propia

7.3. PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN

³⁶ Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [diapositivas], 165 diapositivas, color

Al lograr implementar el flujo de trabajo, se conseguirá predecir el punto sobre la curva donde surgirá el intervalo (P-F) nuevamente, esto según cada cierto periodo de tiempo o de la unidad que esté transcurriendo, de esta forma se consigue el intervalo óptimo para iniciar labores de intervención o mantenimiento, teniendo en cuenta el contexto económico. Cabe destacar que este proceso se puede implementar en cualquier equipo que presente modos de falla claramente definidos o que permita un monitoreo.

7.4. ENTRENAMIENTO EL MODELO

Se sugiere que el proceso investigativo continúe y aunque no hace parte del proyecto, si dejamos a consideración algunas sugerencias que podrán de ser utilidad para futuras investigaciones; por lo que es importante mencionar que entre más condiciones de operaciones exista para el modo de falla, el algoritmo se vuelve más robusto, lo que se asume que el algoritmo tiende a volverse autónomo, y podría llegar a una condición ideal.

El modelo también se entrena con los nuevos datos suministrados, en el momento que se obtiene el intervalo (P-F), el mantenedor pondrá sus estrategias de intervención en el equipo, las cuales conseguirán posiblemente que dicho intervalo este sujeto a modificaciones, es decir, podría crecer hasta un punto inesperado (F) de falla operacional, o desaparecer, hasta que surja nuevamente un punto (P) potencial de falla.

8. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA EN LA PREDICTIVE MAINTENANCE TOOLBOX DE MATLAB

La técnica propuesta se diseñó pensando en pequeñas y grandes industrias logrando abarcar un alcance mayoritario, de esta forma se pretende contribuir a cualquier usuario que requiera mejorar su proceso de mantenimiento, creando una línea de diseño conveniente a un flujo de trabajo que no requiere necesariamente de grandes softwares para su aplicación, aunque mejora representativa la interacción con la técnica. Para la simulación de la técnica se pretende apoyarse de la Toolbox Predictive Maintenance de Matlab, sin embargo y con el fin de apoyar la hipótesis de fácil aplicación, se pretende mostrar el procedimiento de manejo con la Toolbox y sin ella.

8.1. SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE MATLAB Y MICROSOFT EXCEL (SIN LA TOOLBOX)

Probablemente el mayor porcentaje de entidades han trabajado o trabajan con hojas de cálculo de Microsoft Excel, las cuales son eficientes, de fácil manejo y brindan un sinnúmero de herramientas aplicables en diferentes industrias o áreas, el sector de mantenimiento no se excluye al caso. Comúnmente se utilizan las hojas de cálculo en esta área para organizar tareas de mantenimiento, tiempos de operación, tiempos de reparación, etc.

Por otra parte, el software Matlab quizás no tiene la misma presencia en pequeñas y grandes industrias como lo es Microsoft Excel, pero es una herramienta de trabajo multitareas que además es aplicable a una amplia gama de situaciones ingenieriles, médicas, estadísticas, etc.

Esta técnica aprovechara las hojas de cálculo como herramienta para construir la distribución de Weibull, vale destacar que toda la técnica puede ser ejecutada de manera manual, utilizando simplemente una hoja, lápiz y quizás una calculadora, sin embargo, se propone las hojas de cálculo por su impacto y presencia en la mayoría de las industrias. El software Matlab se utilizará únicamente como herramienta de integración y para plasmar las gráficas de la adquisición referentes a las funciones de distribución acumulada y de confiabilidad. Para este capítulo, se proponen dos ejemplos para comprobar la técnica, el primero expuesto a continuación y el segundo como apoyo descrito en el anexo H.

8.1.1. Ejemplo 1: Base de datos prensa hidráulica PH.08³⁷

8.1.1.1. Aplicación de la distribución Weibull

Teniendo presentes las ecuaciones deducidas en el capítulo 7.2.2.1. (Método de deducción para la ecuación lineal de regresión, Weibull) aplicamos el desarrollo de la distribución de Weibull, partiendo de adquirir los tiempos entre fallas, para ello se utilizará una base de datos propuesta bajo el contexto de la asignatura ingeniería de mantenimiento referente a una prensa hidráulica PH-08, la cual la podemos encontrar en el anexo I y se ilustra en la tabla 1.

A continuación, se analizaron los datos facilitados de la historia del equipo, donde nos referencian un registro de 286 datos, en un periodo de tiempo que oscilaba entre el 05/10/2010 y el 23/05/2014. Entre los datos encontramos la fecha de solicitud, la fecha de cumplimiento, el tiempo entre fallas - TBF (Días) y el tiempo entre reparaciones - TTR (Días), esta información se almacena en una hoja de cálculo Microsoft Excel, y se ordena de acuerdo con los tiempos entre fallas de tal forma que queden de manera ascendente, es decir de menor a mayor.

³⁷ Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [Microsoft Excel], 1 hoja de cálculo, color

Tabla 1. Data de una prensa hidráulica PH-08

DATOS HISTÓRICOS PRENSA HIDRÁULICA PH-08							
N° DATO	FECHA	CUMPLIMIENTO	TBF (DIAS) Tiempo entre fallas	TTR (DIAS) Tiempo entre reparación	RM(t)	X=ln (t)	Y=Ln(Ln(1/(1-RM(t))))
1	31/1/2010	31/1/2010	1	1	0.0024	3.17805	- 6.012841
2	7/5/2010	7/5/2010	1	1	0.0059	3.17805	- 5.123786
3	10/7/2010	10/7/2010	1	1	0.0094	3.17805	- 4.659405
4	30/7/2010	30/7/2010	1	1	0.0129	3.17805	- 4.342562
5	3/9/2010	3/9/2010	1	1	0.0164	3.17805	- 4.101565
6	13/9/2010	13/9/2010	1	1	0.0199	3.17805	- 3.906889
7	14/9/2010	14/9/2010	1	1	0.0234	3.17805	- 3.743469
8	14/9/2010	14/9/2010	1	1	0.0269	3.17805	- 3.602573
9	3/2/2011	3/2/2011	1	1	0.0304	3.17805	- 3.478682
10	7/2/2011	7/2/2011	1	1	0.0339	3.17805	- 3.368085
11	11/3/2011	11/3/2011	1	1	0.0374	3.17805	- 3.268168
12	14/3/2011	14/3/2011	1	1	0.0409	3.17805	- 3.177018
13	15/3/2011	15/3/2011	1	1	0.0443	3.17805	- 3.093195
14	15/3/2011	15/3/2011	1	1	0.0478	3.17805	- 3.015585
15	18/4/2011	18/4/2011	1	1	0.0513	3.17805	- 2.943312

Fuente: Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [Microsoft Excel], 1 hoja de cálculo, color

La distribución de Weibull puede proporcionar una serie de datos adicionales a nuestro interés para la técnica, sin embargo, pueden ser atractivos para el usuario que la esté implementado. Para ello se procede como primer paso determinar el F(i) o RM(t) para cada dato, usando la ecuación 12 de rangos medianos de Bernard.

$$F(i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}; \text{ Ecuación 12}$$

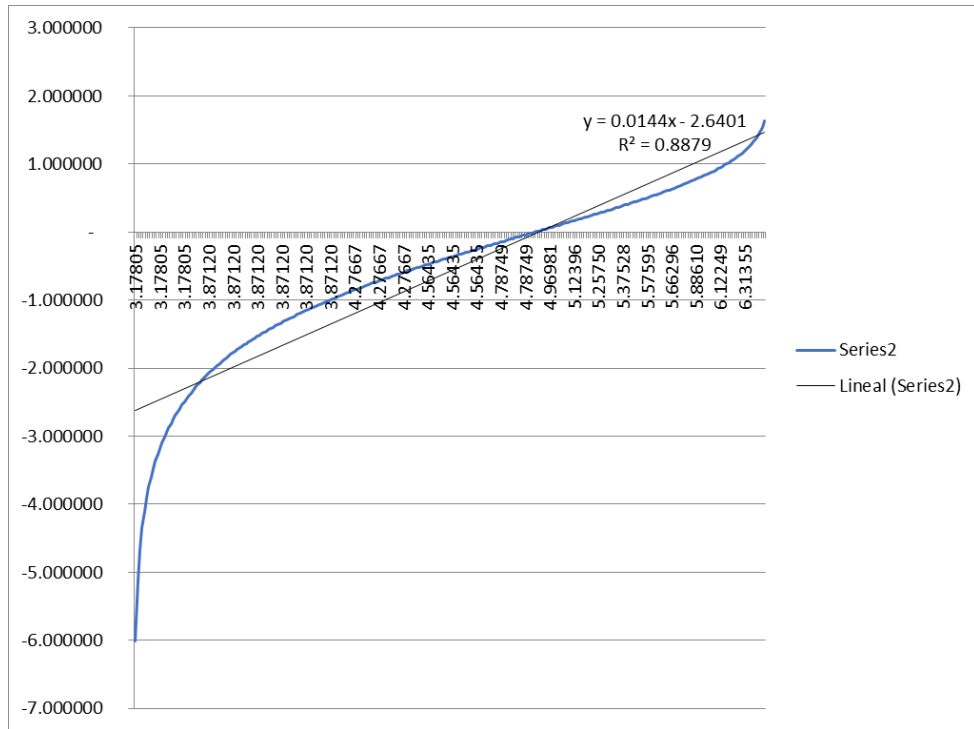
Continuando, se estableció el valor de “x” y “y”, al ejecutar las ecuaciones 7 y 9, respectivamente. De igual forma se repitió este procedimiento para cada dato en el historial de la máquina

$$y = \ln \left[\ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] \right]; \text{ Ecuación 7}$$

$$x = \ln[t - \gamma]; \text{ Ecuación 9}$$

Con los datos de “x” y “y”, se procede a graficar en la hoja de cálculo la distribución de Weibull para el caso en estudio, se identifica la ecuación lineal y por consiguiente el valor de β , el cual nos indica el lugar donde están situados sobre la curva de la bañera y la clase de falla.

Figura 15. Distribución Weibull



Fuente: Elaboración propia

De la figura 15 y la tabla 1, se pueden deducir los siguientes datos concluyentes.

Tabla 2. Resumen de la toma de datos

Fecha de inicio operación	5/1/2010
Fecha final de análisis	23/5/2014
MTBF (horas)	109
MTBF (días)	4.55
No. De fallas	286
Tiempo total de análisis (horas)	38,376
TTR (horas)	7,128
Tiempo operación efectivo (horas)	31,248
Beta	0.0144
Intercepto b (-Beta*Ln n)	- 2.6400

Fuente. Elaboración propia

Hasta el momento estos valores obtenidos no nos aportan nada a nuestra técnica, pero sí dice mucho de los datos en estudio, arrojando como primera conclusión que $\beta < 1$, disminuye la tasa de riesgo, lo cual implica una mortalidad infantil.

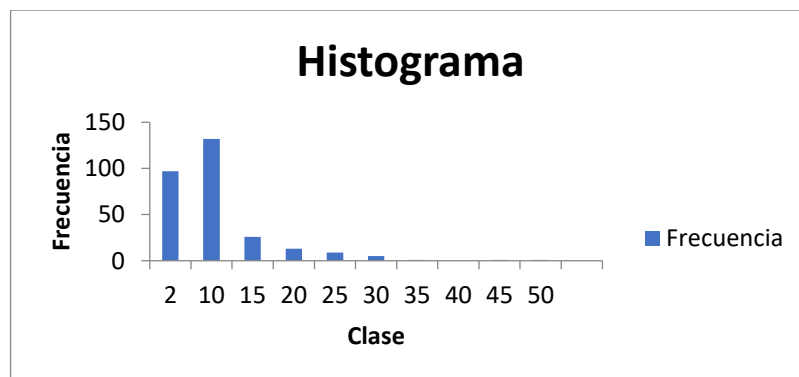
Tabla 3. Tabla de fiabilidad

Clase	Frecuencia
2	97
10	132
15	26
20	13
25	9
30	5
35	1
40	0
45	1
50	1

Fuente. Elaboración propia

Ahora se realiza la tabla de fiabilidad, la cual si requerimos y es de nuestro mayor interés. Usando como clase el tiempo entre fallas, oscilando de 5 en 5 (Días), y como frecuencia la cantidad de fallas presentes en cada periodo de tiempo correspondiente.

Figura 16. Histograma Weibull

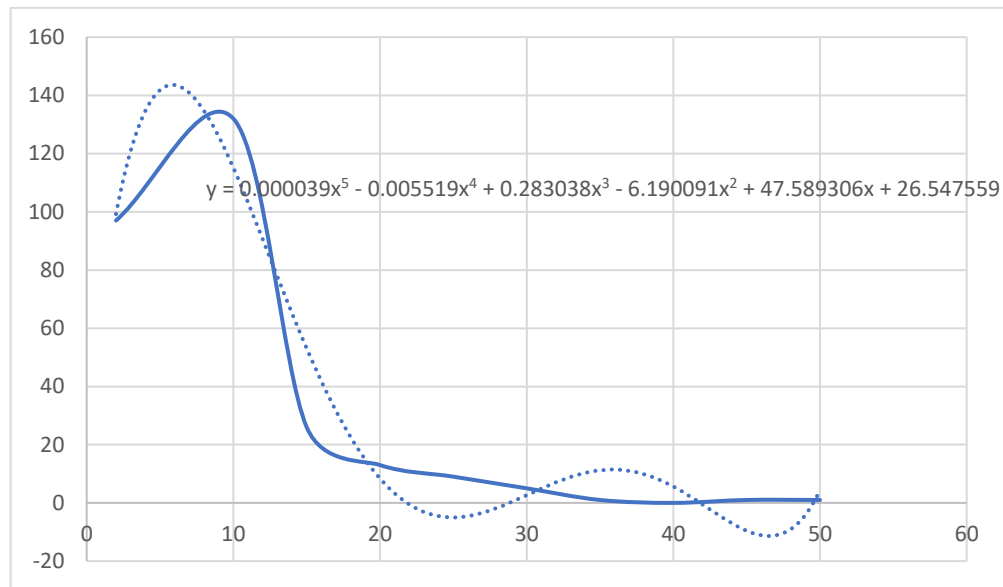


Fuente. Elaboración propia

A partir de la tabla 3 se puede realizar el diagrama de barras o histograma para los datos obtenidos.

Con el fin de obtener del histograma la función de densidad de probabilidad, se opta por cambiar a un gráfico de dispersión y obtener una línea de tendencia, de esta forma se determina la ecuación de la función deseada.

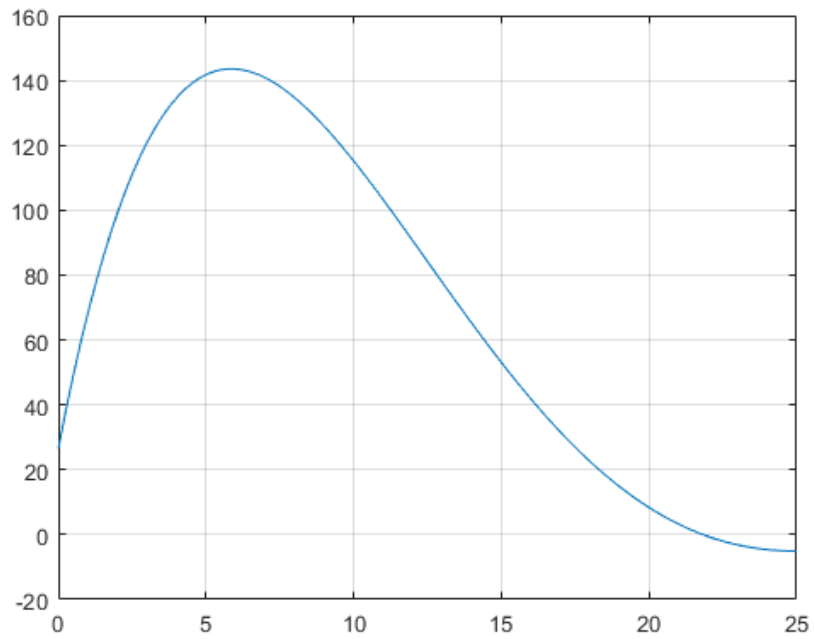
Figura 17. Histograma en forma de gráfico de dispersión



Fuente. Elaboración propia

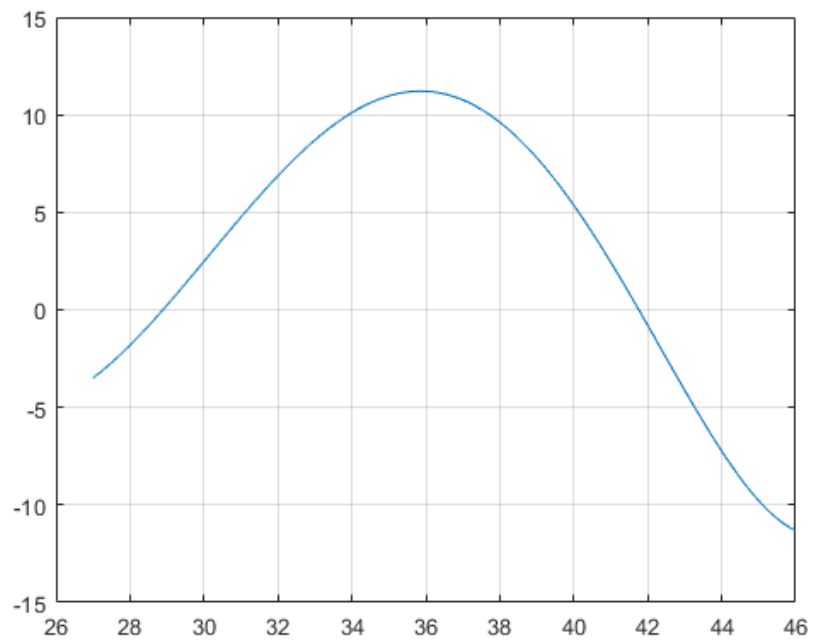
Se prosigue a realizar el análisis del histograma, determinando su media con ayuda de la ecuación 13, y según la data propuesta. Aquí se observa que presenta una media a un tiempo muy temprano, indicando una mortalidad infantil apoyándonos del valor β , sin embargo, se podría analizar para un β mayor que indique una falla aleatoria, ubicándonos en la curva de la bañera hacia la zona de tiempo de vida útil, obteniendo mejores resultados a la hora de graficar la curva de probabilidad de falla.

Figura 18. Función de Densidad de Probabilidad, indicando mortalidad infantil



Fuente. Elaboración propia

Figura 19. Función de Densidad de Probabilidad indicando falla aleatoria



Fuente. Elaboración propia

Se realiza el cálculo de la media, utilizando la figura 18 como se planteó anteriormente.

$$\text{Media estimada; } m = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}; \text{ Ecuación 13}$$

$$m = \frac{267}{8} = 33.375 \text{ [Días]}$$

Por lo tanto, el 50% de confiabilidad se encuentra cuando el tiempo entre fallas es de 33.375 días, al revisar la data propuesta se puede determinar que en la línea de tiempo este punto se encuentra ubicado en el día 1793 de 1884 de operación, también podemos deducir que:

Figura 20. Tiempo Vs % de confiabilidad

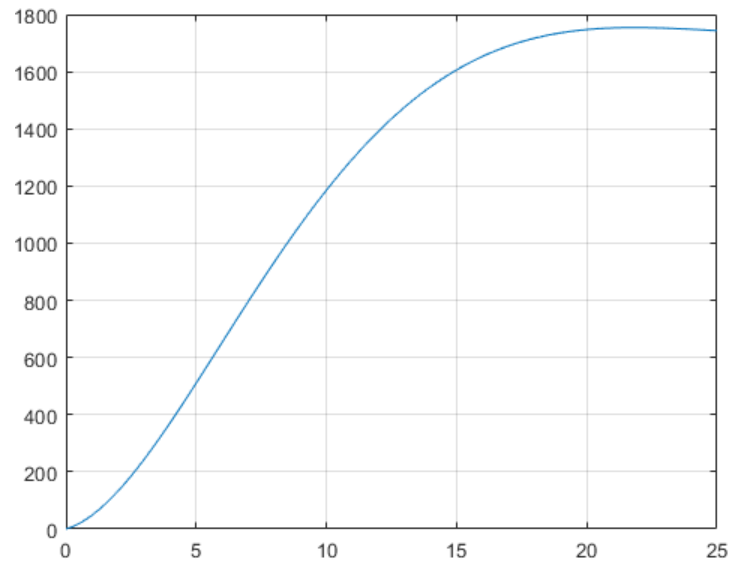
Tiempo (Días)	% de confiabilidad
0	100
358.6	90
717.2	80
1075.8	70
1434.4	60
1793	50
1811.2	40
1829.4	30
1847.6	20
1865.8	10
1884	0

Fuente. Elaboración propia

A continuación, se procede a ingresar la ecuación de la función de densidad de probabilidad en el software Matlab para realizar su respectiva integración y de esta forma determinamos la función de distribución acumulada. La ecuación se define como:

$$f(t) = 0.000039 * x.^5 - 0.005519 * x.^4 + 0.283038 * x.^3 - 6.190091 * x.^2 + 47.589306 * x + 26.547559; \text{ Ecuación 15}$$

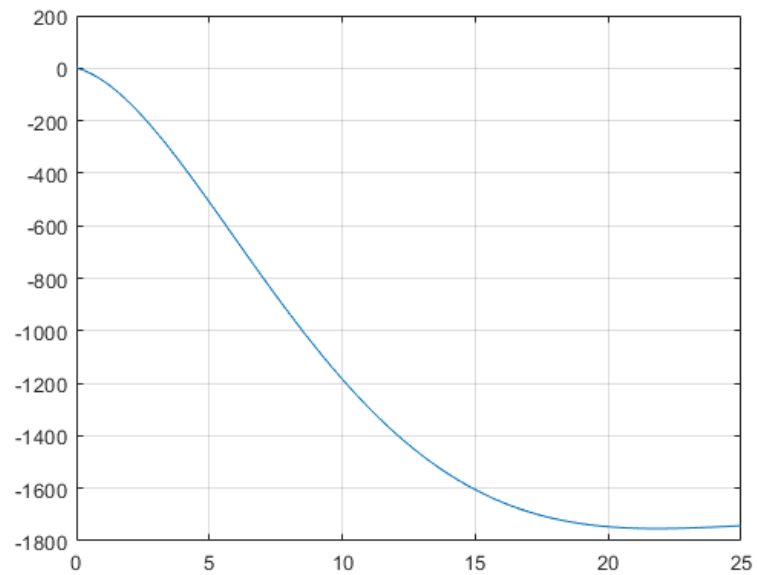
Figura 21. Función de Distribución Acumulada



Fuente. Elaboración propia

Como último paso se procede a determinar la función de confiabilidad, que resulta al expresarla como $1 -$ la función de distribución acumulada.

Figura 22. Función de confiabilidad

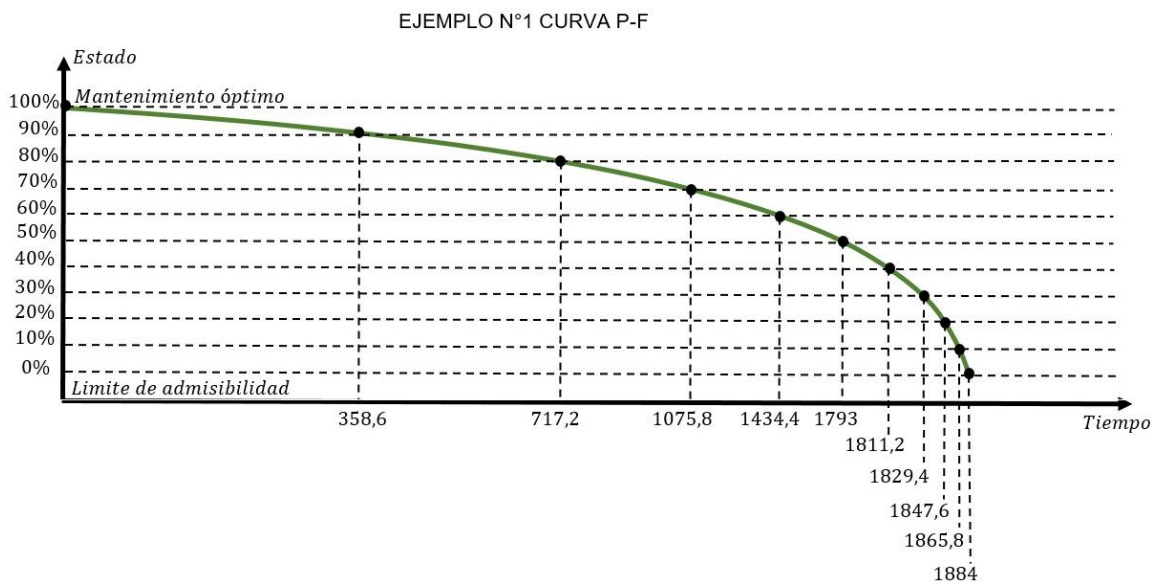


Fuente. Elaboración propia

8.1.1.2. Gráfica (P-F)

La función de confiabilidad nos permite ver con mayor claridad la disminución de la está en el transcurso del tiempo; al tener la interpretación del histograma se tienen los valores del eje “y” de la curva (P-F), evaluados en la unidad de frecuencia de falla o monitoreo, en este caso tiempo (t). Para los valores que se instauran a lo largo del eje “x” de la curva (P-F), se debe seguir el flujo de trabajo asumido en el capítulo 7.2.1. (Eje X: unidades de frecuencia de falla o de reparación), ya que este capítulo se refiere a datos numéricos de sensores o monitoreo, se puede organizarlos y administrarlos en una hoja de cálculo Microsoft Excel.

Figura 23. Construcción de la curva P.F mediante coordenadas



Fuente. Elaboración propia

La gráfica (P-F), se puede construir asignando coordenadas, combinando los datos de frecuencia de monitoreo (eje x), con el análisis de confiabilidad realizado en el histograma (eje y), obteniendo la coordenada del punto de interés. De esta forma se puede crear coordenadas para la condición del activo en cualquier punto de monitoreo; se debe tener presente los límites permisibles para identificar en qué instante aparece el dominio o zona correctiva o síntomas (intervalo P-F).

8.2. SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE PREDICTIVE MAINTENANCE TOOLBOX DE MATLAB³⁸

La Toolbox Predictive Maintenance de Matlab, es en herramienta del software que nos permite realizar múltiples tareas, entre ellas estimar un indicador de salud basado en similitudes, en pocas palabras lo que nos permite es analizar una base de datos y predecir cuánto tiempo de vida tiene dicho activo o cuando podría fallar según sus síntomas. Es por esta razón que se seleccionó para simular nuestra técnica, mediante un ejemplo que muestra cómo crear un flujo de trabajo de estimación de vida útil restante (RUL), incluidos los pasos para el preprocesamiento, la selección de características de tendencia y la construcción de un indicador de riesgo mediante la fusión de sensores.

Para ello se hará uso de un ejemplo que utiliza los datos de entrenamiento del conjunto de datos de desafío PHM2008 perteneciente a la Conferencia Internacional sobre Pronósticos y Gestión de la Salud. La data se puede descargar THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. Disponible en: [https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarit y-based-remaining-useful-life-estimation.html](https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarit-y-based-remaining-useful-life-estimation.html) o en el siguiente enlace https://drive.google.com/drive/folders/1FfPNZg2kZ_XicnAkb1vvX5IBk45Mhpbz?usp=sharing

8.2.1. Escenario experimental

La base de datos está representada por conjuntos datos consistentes en múltiples series temporales multivariadas, cada conjunto de datos se divide a su vez en subconjuntos de entrenamiento y prueba. Cada serie temporal proviene de un motor diferente, es decir, se puede considerar que los datos provienen de una flota

³⁸ THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: [https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarit y-based-remaining-useful-life-estimation.html](https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarit-y-based-remaining-useful-life-estimation.html)

de motores del mismo tipo, cada motor arranca con diferentes grados de desgaste inicial y variación de fabricación que el usuario desconoce.

Este desgaste y variación se considera normal, es decir, no se considera una condición de falla, hay tres configuraciones operativas que tienen un efecto sustancial en el rendimiento del motor, estos ajustes también se incluyen en los datos. Los datos al igual que como se trató en el capítulo 6.4 están contaminados con el ruido del sensor.

El motor funciona normalmente al comienzo de cada serie temporal y comienza a degradarse en algún momento durante la serie, en el conjunto de entrenamiento la degradación crece en magnitud hasta que se alcanza un umbral predefinido más allá del cual no es preferible operar el motor. En el conjunto de prueba, la serie temporal finaliza algún tiempo antes de la degradación completa.

Los datos se proporcionan como un archivo de texto comprimido zip con 26 columnas de números, separados por espacios, cada fila es una instantánea de los datos tomados durante un solo ciclo operativo; cada columna es una variable diferente.

1. Las columnas corresponden a:
2. Número de unidad
3. Tiempo, en ciclos
4. Configuración operativa 1
5. Configuración operativa 2
6. Configuración operativa 3
7. Sensor de medida 1
8. Sensor de medida 2
- ...
26. Sensor de medición 26

8.2.2. Preparación de datos

Dado que el conjunto de datos es relativamente pequeño, es factible cargar todos los datos de degradación en la memoria. Usando la función auxiliar "helperLoadData" para cargar y convertir el archivo de texto de capacitación en una matriz de celdas de horarios. Los datos de entrenamiento contienen 218 simulaciones de ejecución hasta el fallo, este grupo de medidas se denomina "conjunto".

```
degradationData = helperLoadData('train.txt');  
degradationData(1:5)
```

Figura 24. Lectura de la data

```
ans = 5x1 cell array  
    {223x26 table}  
    {164x26 table}  
    {150x26 table}  
    {159x26 table}  
    {357x26 table}
```

Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

Cada miembro del conjunto es una tabla con 26 columnas. Las columnas contienen datos para la identificación de la máquina, marca de tiempo, 3 condiciones de funcionamiento y 21 mediciones del sensor.

Aquí aplicamos lo dicho en el capítulo 7.2.1.1, referente al segmento de la técnica del eje "x", donde adquirimos y organizamos los datos.

```
head(degradationData{1})
```

Figura 25. Data en forma de tabla leída por la Toolbox

```
ans=8x26 table
```

id	time	op_setting_1	op_setting_2	op_setting_3	sensor_1	sensor_2	sensor_3	sensor_4
1	1	10.005	0.2501	20	489.05	604.13	1499.5	1310
1	2	0.0015	0.0003	100	518.67	642.13	1584.5	1404
1	3	34.999	0.8401	60	449.44	555.42	1368.2	1122.5
1	4	20.003	0.7005	0	491.19	607.03	1488.4	1249.2
1	5	42.004	0.8405	40	445	549.52	1354.5	1124.3
1	6	20.003	0.7017	0	491.19	607.37	1480.5	1258.9
1	7	42	0.84	40	445	549.57	1354.4	1131.4
1	8	0.0011	0	100	518.67	642.08	1589.5	1407.6

Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

A continuación, se dividen los datos de degradación en un conjunto de datos de entrenamiento y un conjunto de datos de validación para una evaluación posterior del rendimiento.

```
rng('default') % Para asegurarse de que los resultados sean repetibles
numEnsemble = length(degradationData);
numFold = 5;
cv = cvpartition(numEnsemble, 'Kfold', numFold);
trainData = degradationData(training(cv, 1));
validationData = degradationData(test(cv, 1));
```

Se especifican grupos de variables de interés. Es decir, aquí tenemos identificados los modos de falla como se expresa en el capítulo 7.2.1.2, por ende, se procesan los datos y seleccionamos las variables de interés, que son aquellas en las que nos enfocaremos para el análisis.

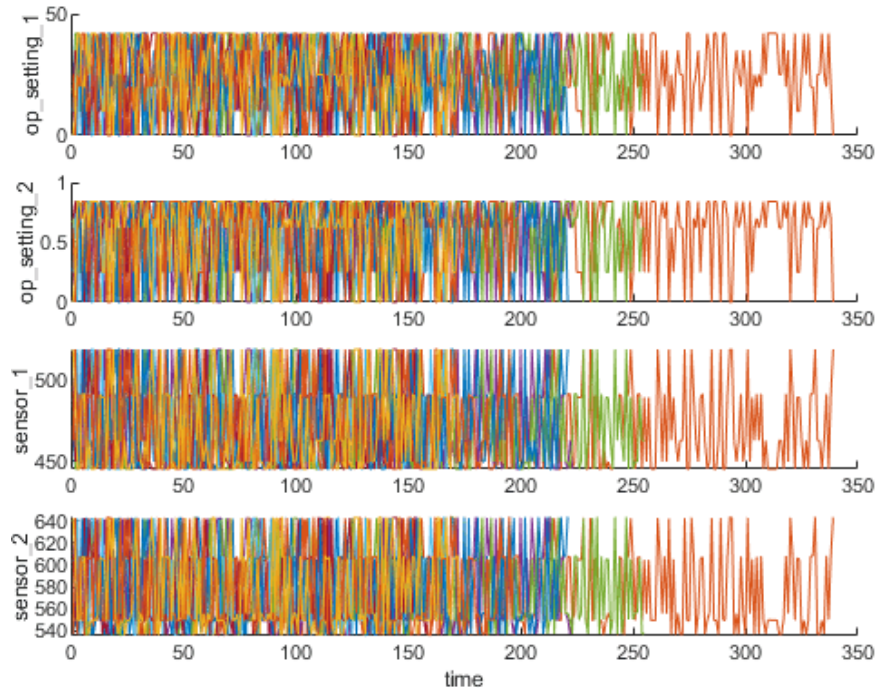
```
varNames = string(degradationData{1}.Properties.VariableNames);
timeVariable = varNames{2};
conditionVariables = varNames(3:5);
dataVariables = varNames(6:26);
```

Por último, se realiza la respectiva visualización de una muestra de los datos del conjunto, figura 26.

```
nsample = 10;
figure
helperPlotEnsemble(trainData, timeVariable, ...
```

```
[conditionVariables(1:2) dataVariables(1:2)], nsample)
```

Figura 26. Datos del conjunto



Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

8.2.3. Régimen de Trabajo Clustering

Como se muestra en la sección anterior, no existe una tendencia clara que muestre el proceso de degradación en cada medición de funcionamiento hasta el fallo. En esta sección y en la siguiente, se utilizarán las condiciones de funcionamiento para extraer tendencias de degradación más claras de las señales de los sensores.

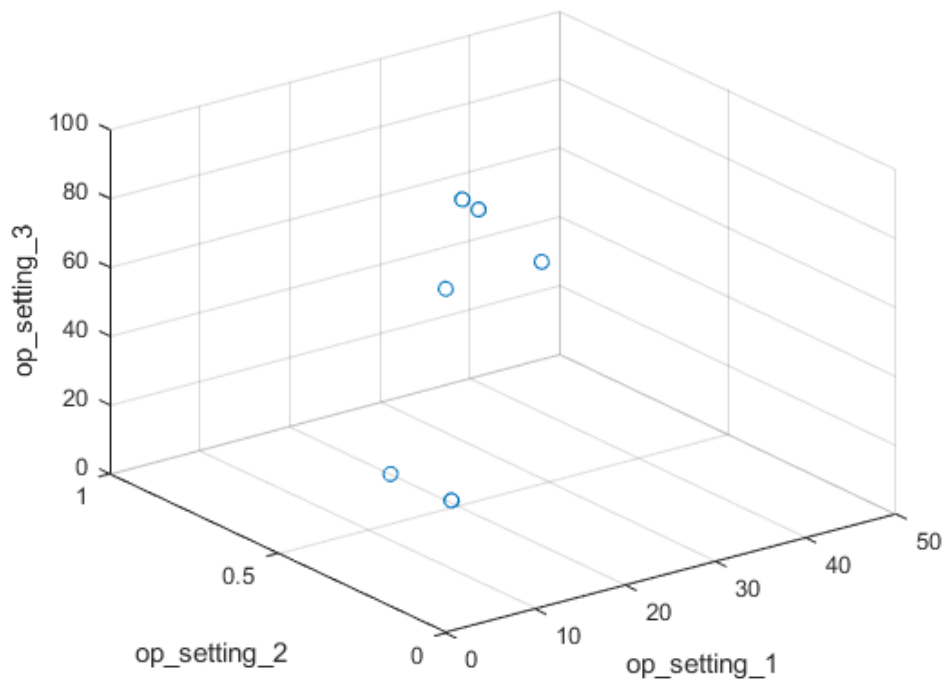
Se tiene en cuenta que cada miembro del conjunto contiene 3 condiciones operativas: "op_setting_1", "op_setting_2" y "op_setting_3". Estas condiciones operativas representan los indicadores o límites permisibles descritos en el capítulo 7.2.1.3, para la ejecución idónea de los motores. Para ello se extrae la tabla de cada celda y la concretamos en una sola tabla, esto significa que realizamos el proceso de datos como se define en el capítulo 7.2.1.4.

```
trainDataUnwrap = vertcat(trainData{:});  
opConditionUnwrap = trainDataUnwrap(:, cellstr(condicionVariables));
```

Ahora se visualizan todos los puntos operativos en un diagrama de dispersión 3D, mostrando claramente 6 regímenes.

```
figura  
helperPlotClusters(opConditionUnwrap)
```

Figura 27. Diagrama de dispersión



Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

De aquí en adelante nos enfocamos en poder terminar un indicador de estado, si lo hiciéramos manualmente actuaríamos por distribución de Weibull, sin embargo, aquí se aplica el análisis de componentes principales como método de distribución, ya que la Toolbox lo predispone de esta manera debido a la cantidad de datos y sensores en ejecución, de esta forma se hará más sencillo el análisis, a su vez, se combina este método con una normalización de los datos arrojados previamente, para posteriormente realizar un análisis de tendencia.

Figura 28. Análisis de costo

```
Replicate 1, 1 iterations, total sum of distances = 0.279547.  
Replicate 2, 1 iterations, total sum of distances = 0.279547.  
Replicate 3, 1 iterations, total sum of distances = 0.279547.  
Replicate 4, 1 iterations, total sum of distances = 0.279547.  
Replicate 5, 1 iterations, total sum of distances = 0.279547.  
Best total sum of distances = 0.279547
```

Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

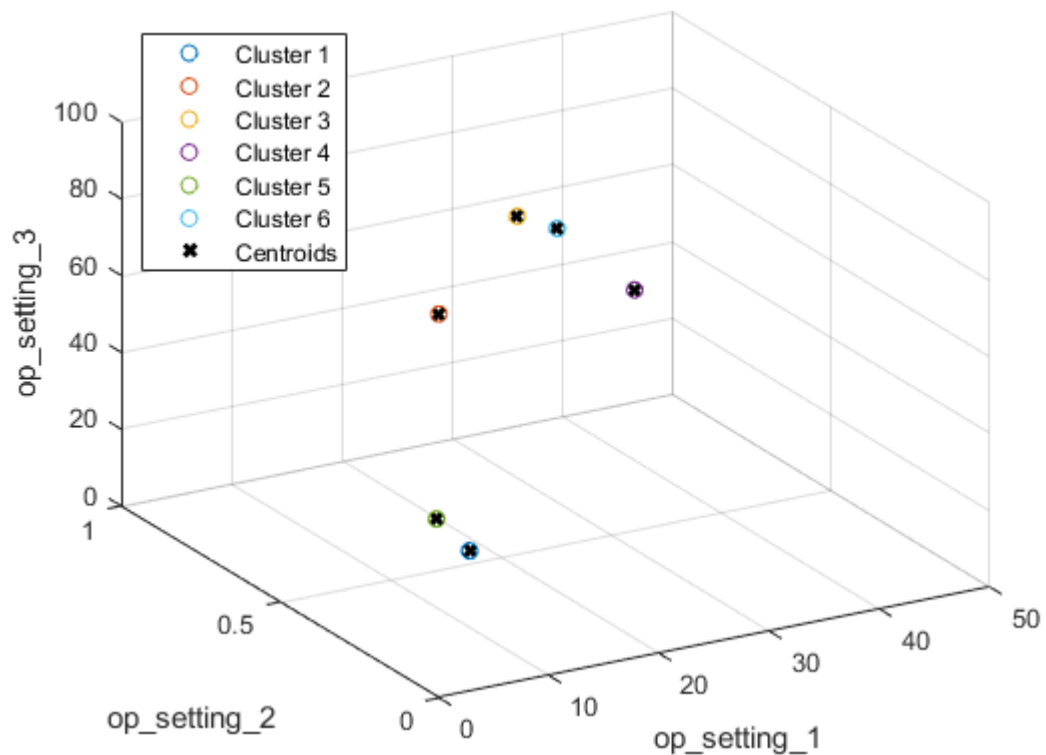
Se usan técnicas de agrupamiento para ubicar los 6 clusters automáticamente. Aquí, se utiliza el algoritmo de K-medias. K-means, es uno de los algoritmos de agrupamiento más populares. Es una buena práctica repetir el algoritmo de agrupamiento de K-medias varias veces con diferentes condiciones iniciales y seleccionar los resultados con el menor costo, como se hace referencia en el capítulo 7.3, en este caso, el algoritmo se ejecuta 5 veces y los resultados son idénticos, como se puede apreciar en la figura 28.

```
opts = statset( 'Pantalla' , 'final' );  
[clusterIndex, centers] = kmeans(table2array(opConditionUnwrap), 6, ...  
    'Distance' , 'sqeuclidean' , 'Replicates' , 5, 'Options' , opts);
```

Ahora se puede visualizar los resultados de la agrupación y sus respectivos centroides identificados. Como ilustra la figura 29, el algoritmo de agrupamiento encuentra con éxito los 6 regímenes de trabajo.

```
figure  
helperPlotClusters(opConditionUnwrap, clusterIndex, centers)
```

Figura 29. Diagrama de dispersión con sus respectivos centroides



Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

8.2.4. Normalización del Régimen de Trabajo

Realicemos una normalización sobre medidas agrupadas por diferentes regímenes de trabajo. Primero, se calcula la media y la desviación estándar de

cada medición del sensor agrupada por los regímenes de trabajo identificados en la última sección.

```
centerstats = struct('Mean', table(), 'SD', table());
for v = dataVariables
    centerstats.Mean.(char(v)) = splitapply(@mean, trainDataUnwrap.(char(v)),
clusterIndex);
    centerstats.SD.(char(v)) = splitapply(@std, trainDataUnwrap.(char(v)),
clusterIndex);
end
centerstats.Mean
```

Figura 30. Normalización de las medidas de agrupación

```
ans=6x21 table
```

sensor_1	sensor_2	sensor_3	sensor_4	sensor_5	sensor_6	sensor_7	sensor_8	sensor_9	sensor_10
489.05	604.92	1502.1	1311.4	10.52	15.493	394.32	2319	8784.1	1.26
518.67	642.71	1590.7	1409.4	14.62	21.61	553.3	2388.1	9062.3	1.3
462.54	536.87	1262.8	1050.6	7.05	9.0275	175.4	1915.4	8014.9	0.93989
445	549.72	1354.7	1128.2	3.91	5.7158	138.62	2212	8327	1.0202
491.19	607.59	1486	1253.6	9.35	13.657	334.46	2324	8729.1	1.0777
449.44	555.82	1366.9	1131.9	5.48	8.0003	194.43	2223	8355.2	1.0203

Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

```
centerstats.SD
```

Figura 31. Normalización de las medidas de agrupación en estadísticas centrales

```
ans=6x21 table
```

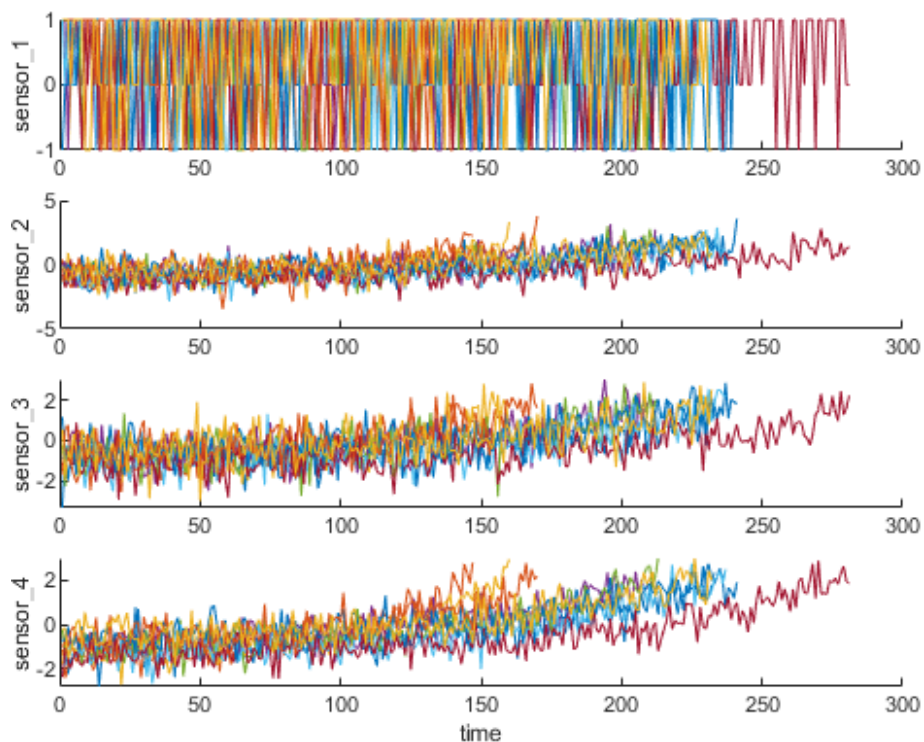
sensor_1	sensor_2	sensor_3	sensor_4	sensor_5	sensor_6	sensor_7	sensor_8	sensor_9	sensor_10
1.4553e-11	0.47617	5.8555	8.3464	1.1618e-12	0.0047272	0.65536	0.094487	18.057	1.51e-13
4.059e-11	0.48566	5.9258	8.8223	3.7307e-14	0.0011406	0.86236	0.068654	20.061	1.2103e-13
2.7685e-11	0.35468	5.2678	6.9664	2.043e-14	0.0043301	0.45074	0.2743	14.741	0.0010469
0	0.44169	5.6853	7.5741	1.9763e-13	0.0049401	0.44198	0.30713	18.389	0.0014951
4.4456e-11	0.46992	5.7664	7.8679	8.9892e-13	0.0046633	0.59984	0.13032	17.983	0.0042388
4.3489e-11	0.44341	5.7224	7.4842	3.7485e-13	0.0017642	0.4734	0.28889	17.608	0.0017978

Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

Las estadísticas de cada régimen se pueden utilizar para normalizar los datos de entrenamiento. Para cada miembro del conjunto, se extrae los puntos operativos de cada fila, se calcula su distancia a los centros de cada grupo y se encuentra el centro de grupo más cercano, luego para cada medición del sensor, se resta la media y se divide por la desviación estándar de ese grupo, si la desviación estándar está cerca de 0, se configura la medición del sensor normalizada en 0 porque una medición del sensor casi constante no es útil para estimar la vida útil restante.

```
trainDataNormalized = cellfun(@(data) regimeNormalization(data, centers,  
centerstats), ...  
trainData, 'UniformOutput', false);
```

Figura 32. Régimen de trabajo normalizado



Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

Se visualizan en la figura 29 los datos normalizados por régimen de trabajo. Las tendencias de degradación de algunas mediciones de sensores ahora se revelan después de la normalización.

```
figure
helperPlotEnsemble(trainDataNormalized, timeVariable, dataVariables(1:4),
nsample)
```

8.2.5. Análisis de tendencia

Ahora seleccionamos las mediciones de sensores más populares para construir un indicador de salud para la predicción. Para cada medición del sensor, se estima un modelo de degradación lineal y se clasifican las pendientes de las señales.

```
numSensors = length(dataVariables);
signalSlope = zeros(numSensors, 1);
warn = warning('off');
for ct = 1:numSensors
    tmp = cellfun(@(tbl) tbl(:, cellstr(dataVariables(ct))),
trainDataNormalized, 'UniformOutput', false);
    mdl = linearDegradationModel(); % create model
    fit(mdl, tmp); % train mode
    signalSlope(ct) = mdl.Theta;
end
warning(warn);
```

Se ordenan las pendientes de la señal y se seleccionan 8 sensores con las pendientes más grandes.

```
[~, idx] = sort(abs(signalSlope), 'descend');
sensorTrended = sort(idx(1:8))
```

Figura 33. Sensores con mayor pendiente

```
sensorTrended = 8×1
```

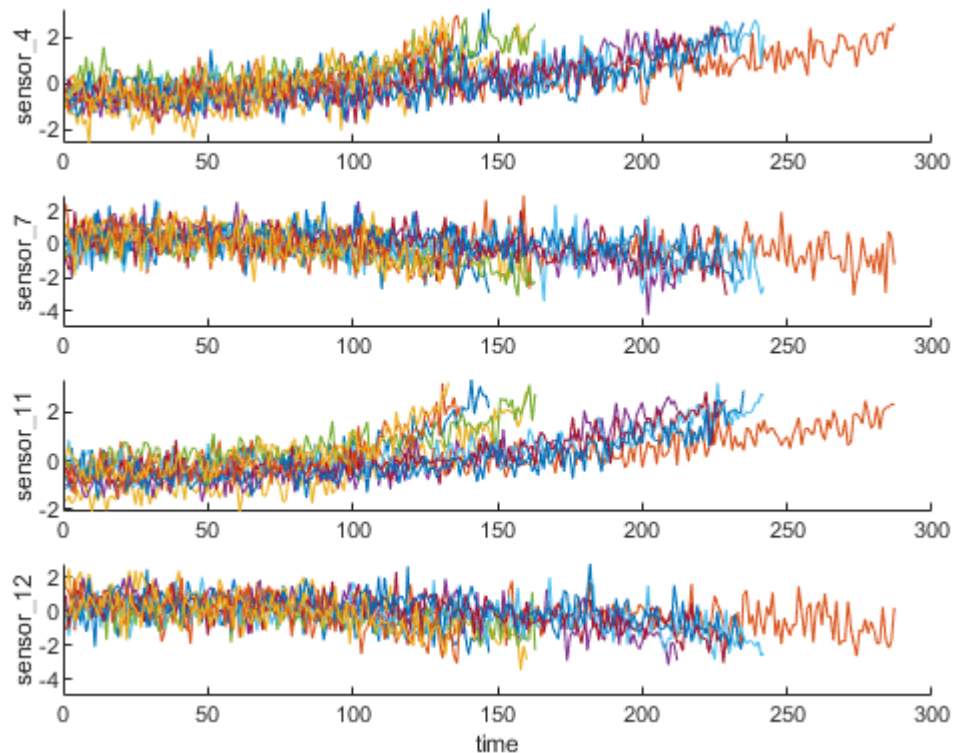
```
2
3
4
7
11
12
15
17
```

Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

Se visualizan las mediciones del sensor de tendencias seleccionadas.

```
figure  
helperPlotEnsemble(trainDataNormalized, timeVariable,  
dataVariables(sensorTrended(3:6)), nsample)
```

Figura 34. Visualización de los sensores seleccionados



Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

Tenga en cuenta que algunas de las señales más populares muestran tendencias positivas, mientras que otras muestran tendencias negativas.

8.2.6. Construir indicador de riesgo

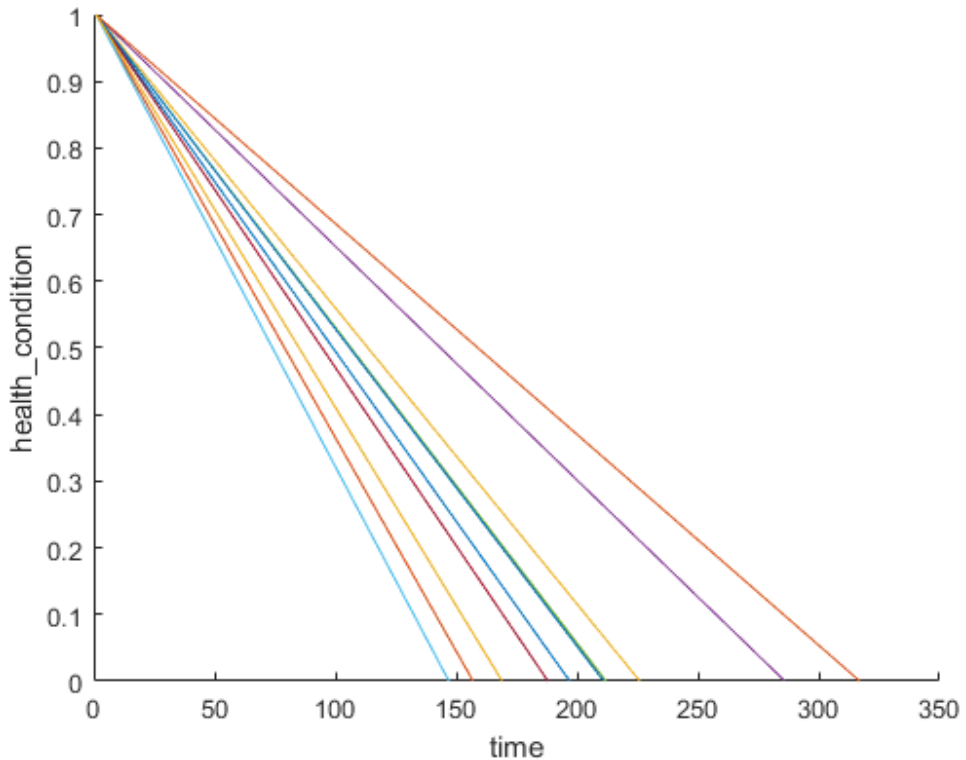
Esta sección se enfoca en fusionar las mediciones del sensor en un solo indicador de riesgo, con el cual se entrena un modelo basado en la similitud. Se supone que todos los datos de ejecución hasta el fallo comienzan con una condición saludable. La condición de riesgo al principio se le asigna un valor de 1 y a la condición de riesgo en caso de falla se le asigna un valor de 0, se supone que la condición de riesgo se degrada linealmente de 1 a 0 con el tiempo, esta degradación lineal se utiliza para ayudar a fusionar los valores del sensor.

```
for j=1:numel(trainDataNormalized)
    data = trainDataNormalized{j};
    rul = max(data.time)-data.time;
    data.health_condition = rul / max(rul);
    trainDataNormalized{j} = data;
end
```

Cómo se evidencia en la figura 35, visualizamos el estado de riesgo actual del activo.

```
figure
helperPlotEnsemble(trainDataNormalized, timeVariable, "health_condition",
nsample)
```

Figura 35. Estado de salud del activo



Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

El estado de riesgo de todos los miembros del conjunto cambia de 1 a 0 con distintas velocidades de degradación, para la técnica propuesta esta velocidad se define en el capítulo 7.2.2.2, como la función de confiabilidad. Ahora se ajusta un modelo de regresión lineal para la condición de riesgo con las mediciones de sensores más populares como regresores:

Condición de Salud \sim 1 + Sensor2 + Sensor3 + Sensor4 + Sensor7 + Sensor11 + Sensor12 + Sensor15 + Sensor17

```
trainDataNormalizedUnwrap = vertcat(trainDataNormalized{:});
```

```
sensorToFuse = dataVariables(sensorTrended);
X = trainDataNormalizedUnwrap(:, cellstr(sensorToFuse));
y = trainDataNormalizedUnwrap.health_condition;
regModel = fitlm(X,y);
bias = regModel.Coefficients.Estimate(1)
```

Figura 36. Coeficientes de estimación

```
bias = 0.5000
```

Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

```
weights = regModel.Coefficients.Estimate(2:end)
```

Figura 37. Coeficientes de estimación para cada sensor

```
weights = 8x1
-0.0308
-0.0308
-0.0536
0.0033
-0.0639
0.0051
-0.0408
-0.0382
```

Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

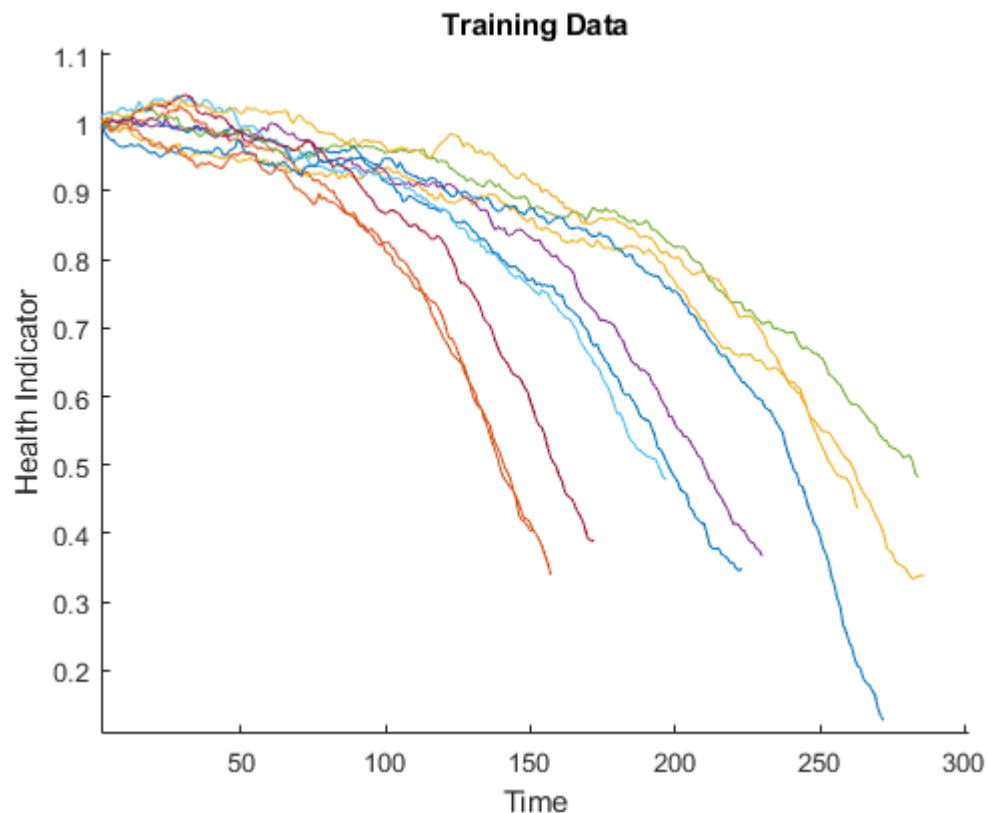
Se construye un solo indicador de salud multiplicando las medidas del sensor con sus pesos asociados.

```
trainDataFused = cellfun(@(data) degradationSensorFusion(data, sensorToFuse,  
weights), trainDataNormalized, ...  
    'UniformOutput', false);
```

Finalmente se visualiza el indicador de salud fusionado para los datos de entrenamiento.

```
figure  
helperPlotEnsemble(trainDataFused, [], 1, nsample)  
xlabel('Time')  
ylabel('Health Indicator')  
title('Training Data')
```

Figura 38. Indicador de riesgo fusionado a los datos de entrenamiento



Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

Los datos de múltiples sensores se fusionan en un solo indicador de riesgo. El indicador de riesgo se suaviza con un filtro de promedio móvil.

8.3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Al ejecutar el flujo de trabajo propuesto para la técnica, se logra llegar a la formulación de una curva que permite identificar el intervalo óptimo de trabajo para que el usuario intervenga su activo y realice actividades de mantenimiento con una mejor perspectiva y de mayor calidad. En este libro se han probado dos estrategias de simulación, que consisten en la utilización Microsoft Excel y la Toolbox de Matlab

8.3.1. Construcción de la curva P-F en Microsoft Excel sin la Toolbox

Se puede establecer la gráfica deseada al implementar el paso a paso propuesto evidenciando la facilidad de la técnica en su ejecución, comprobando que no requiere de un software de gran capacidad para cumplir con el objetivo a su vez apoyada por la técnica estadística de Weibull, permitiendo obtener la confiabilidad del activo en cualquier línea de tiempo dentro del historial de fallas. A diferencia del uso de la Toolbox, en este es más complejo el procesamiento de datos si estos son de gran tamaño o de una mayor cantidad, es por eso por lo que se espera que este tipo de ejecución sea aplicado por medianas y pequeñas empresas donde no es de fácil acceso a una licencia de Matlab y no cuentan con datos históricos tan extensos.

Al ejecutar el análisis de la base de datos según la técnica estadística se logra plantear la función de distribución de densidad que dará pie a la estructuración de las funciones de confiabilidad y a su vez brinda la posibilidad de realizar el análisis del histograma resultante por los tiempos entre fallas.

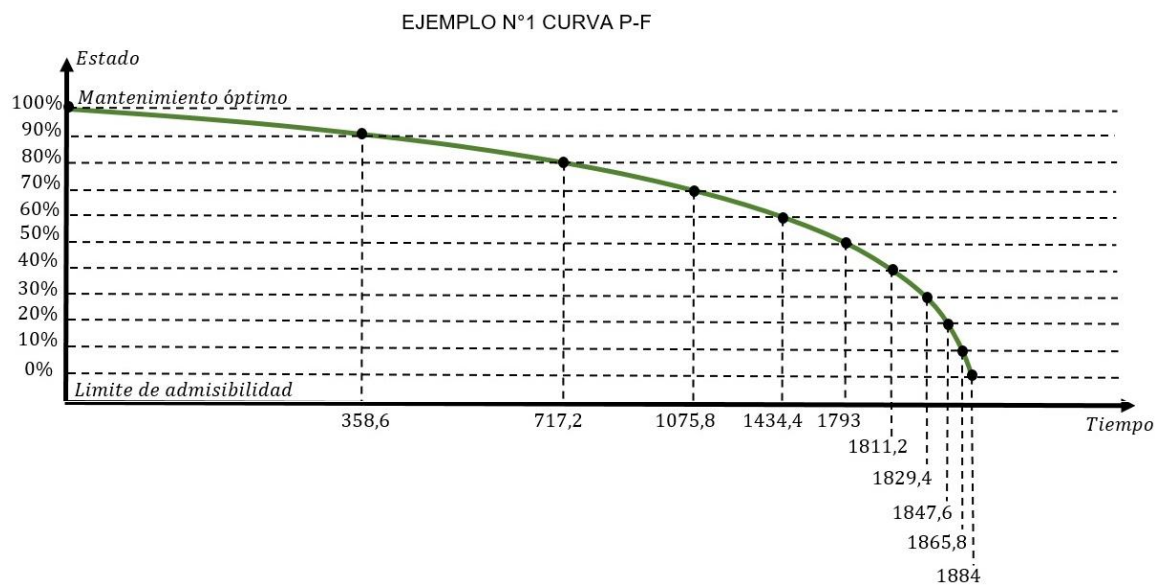
Tabla 4. Confiabilidad vs Tiempo

Tiempo (Días)	Estado
0	100
358.6	90
717.2	80
1075.8	70
1434.4	60
1793	50
1811.2	40
1829.4	30
1847.6	20
1865.8	10
1884	0

Fuente. Elaboración propia

Con esta serie de resultados se obtiene la curva como se ve en la figura 39, con los valores descritos en la tabla 5, referentes al ejemplo 1, al interceptar la función de confiabilidad con la curva P-F planteada, según la frecuencia descritas a lo largo del eje X

Figura 39. Curva P-F obtenida por método estadístico Weibull sin la Toolbox



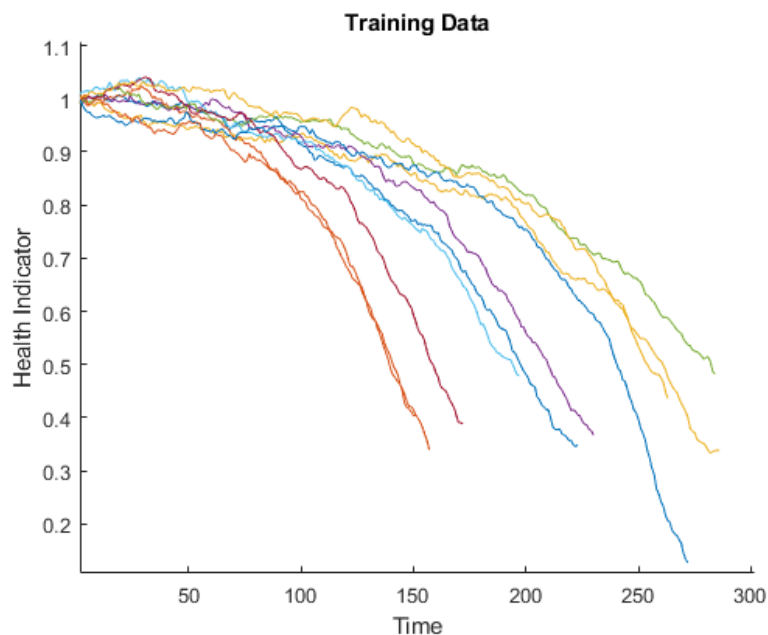
Fuente. Elaboración propia

El intervalo (P-F) está sujeto a interpretación según el contexto operación que el usuario implemente de acuerdo con los modos de falla, para la base de datos implementada en el ejemplo, no se especificó que monitorea el cliente, por ello no se establecieron parámetro o límites permisibles.

8.3.2. Construcción de la curva P-F con la Toolbox

La Toolbox está dirigida a una metodología muy general de mantenimiento predictivo con funciones ya preestablecidas que usamos a conveniencia para ejecutar el flujo de trabajo, entre ellas la técnica estadística que se aplica es una combinación entre el análisis de componentes principales y normalización de datos, se hace de esta manera exclusivamente porque el software así lo procesa, pero se mantiene la línea de trabajo.

Figura 40. Curva P-F obtenida con la Toolbox de Matlab



Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

Al ejecutar la técnica en la Toolbox, el resultado que se obtiene es la construcción de un indicador de riesgo, es de aclarar que la curva (P-F), no representa el mismo enfoque, aunque, la gráfica del indicador se comporta de manera similar llevando la curva hasta el final de la vida del activo; sin embargo, funcionándolas se puede hacer un puente entre ambos temas y al establecer los indicadores o límites permisibles, se puede conseguir el intervalo (P-F), resultado que se desea por la técnica. La Toolbox no está diseñada para construir curvas de probabilidad de falla, pero como se observa en la figura 45, se puede utilizar sus herramientas para obtener el objetivo deseado.

Se puede construir la curva (P-F) en la Toolbox, sin necesidad del indicador de riesgo, pero para ello se debe crear nuevas funciones que ejecute la Toolbox, tema que le atañe a un profesional enfocado en programación y que se sale de la línea de trabajo del presente trabajo de investigación.

8.3.3. Análisis de resultados

Los resultados arrojados en esta investigación realizada por los autores de esta tesis son favorables, la ejecución de la técnica permite por primera vez fuera del contexto educativo la construcción de la curva de probabilidad de falla, arrojando una innovación que las industrias y el sector de mantenimiento pueden aplicar en su entorno de trabajo.

Se realizan dos simulaciones de la técnica, con diferentes software y se elige la simulación ejecutada en Microsoft Excel, ya que la curva resultante se comporta de manera satisfactoria presentando una forma suave y de mayor similitud a la teoría expuesta como se puede apreciar en la figura 39, sin embargo, se recomienda que para detectar el intervalo (P-F), se utilice un software que presente el mismo comportamiento gráfico, pero que brinde la posibilidad de alertar automáticamente al usuario cuando la data se salga de los parámetros operacionales establecidos. La Toolbox de Matlab, puede cumplir con todas las expectativas, pero se

considera que no sería cien por ciento aplicable en las pequeñas y medianas empresas, debido al costo de esta, su dificultad de ejecución y la necesidad de un profesional capacitado para su manejo, además de la formulación de nuevas ecuaciones para la construcción exclusiva de una curva de probabilidad de falla, de lo contrario se ejecutaría un indicador de riesgo, el cual funciona, solo y solo si el usuario conoce el comportamiento, similitud y diferencia entre las dos curvas.

9. CONCLUSIONES

La técnica propuesta se desarrolla en base al análisis de condición, por esta razón la técnica solo puede ser aplicable si el elemento tiene características que hacen posible definir una condición de falla potencial, para poder definir dicha condición, se debe poder aplicar una tarea basada en monitoreo.

Las tareas de condición o monitoreo se definen para modos de falla específicos, por ende, la curva de probabilidad de falla es construida para modos de falla, limitándola según estas tareas y cabe destacar que este proceso se puede implementar un cualquier equipo que presente modos de falla claramente definidos.

La curva no es genérica, por lo que servirá exclusivamente para plasmar una estadística de mejora en el siguiente activo, cada vez que se realice un reemplazo del elemento, se debe construir nuevamente una curva, a pesar de ser la misma pieza, el mismo modo de falla, o las mismas condiciones de operación, ya que existe la posibilidad de que haya un cambio dentro de la vida del activo, además este presenta síntomas temporales cuantificables, prediciendo la ocurrencia de una falla.

La falla potencial como la frecuencia de las inspecciones dependen del objetivo de la tarea de condición, si se enfoca en seguridad sólo se considerará efectiva si minimiza la probabilidad de una falla crítica, si la falla no involucra seguridad, entonces la efectividad se mide en términos económicos, es decir, la tarea es efectiva solo si es rentable. En el caso de consecuencias operativas, esto significa que el costo de encontrar y corregir fallas potenciales debe ser menor que el costo combinado de las consecuencias operativas más el costo de reparación de las unidades defectuosas.

Al lograr implementar el flujo de trabajo propuesto, se consigue la construcción de la curva de probabilidad de falla, que no es aplicada de forma teórica sino de forma práctica como se expone en el capítulo 8 y en el anexo H; prediciendo el punto sobre la curva donde surgirá el intervalo (P-F), esto según cada cierto periodo de tiempo o de la unidad que esté transcurriendo, de esta forma se consigue el intervalo óptimo para iniciar labores de intervención o mantenimiento, que es el interés del mantenedor, dichas labores deben dar inicio mínimamente a la mitad de este periodo, la curva no predice cuándo ocurrirá la falla, solo cuando se debe iniciar la intervención del activo, por lo que no representa la vida útil del mismo.

La técnica propuesta no se limita únicamente al software Matlab, o algún software en particular, se podría crear líneas de código en otros programas que lean y ejecuten las bases de datos y sigan el flujo de trabajo, esto se decide a conveniencia del usuario y sus capacidades, se propuso utilizar Matlab, por el acceso que se tiene mediante la licencia estudiantil que aporta la Universidad Industrial de Santander, asimismo por su versatilidad, gran capacidad de procesar datos y que brinda una herramienta específica para el mantenimiento predictivo, la Toolbox Predictive Maintenance.

10.RECOMENDACIONES

La curva sirve para predecir el intervalo óptimo de intervención, denominado dominio o zona correctiva o síntomas, sin embargo, según sea el caso de puede intervenir antes, esto se decide según los factores de criticidad, por otra parte no se recomienda la intervención en el Dominio o zona reactiva, ya que este es el lugar más costoso y peligroso para que una empresa realice la mayor parte de su trabajo de mantenimiento, dado que la probabilidad de daños en el activo analizado es alta, produciendo daños a equipos secundarios, lo que multiplica el costo de reparación más de cinco veces en comparación con completarlo en el dominio correctivo.

Es recomendable que el usuario implemente y entrene la técnica bajo diferentes condiciones operativas, ya que esto le proporciona una robustez y predicciones más acertadas, al conocer mayores sucesos históricos de modos de falla o del mismo.

Como recomendación final, este proyecto da la oportunidad de una continuidad, dando la libertad de crear una propuesta de código en otro software diferente al planteado, que siga el flujo de trabajo descrito, quizás hasta la construcción de un programa único en la industria del mantenimiento, para ello vale destacar que es importante el entrenamiento y la variación de modos de falla y condicione operativas.

REFERENCIAS

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. Mantenimiento Terminología del mantenimiento. Requisitos. UNE EN 13306. [en línea]. Madrid, España: 2018.

CAPTERRA. Software de gestión de mantenimiento. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.capterra.co/directory/30058/maintenance-management/software>

CLÍNICA UNIVERSIDAD DE NAVARRA. Diccionario Médico, Detectabilidad. [sitio web]. 2020. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.cun.es/diccionariomedico/terminos/detectabilidad#:~:text=f.,estudio%20mediante%20t%C3%A9cnicas%20o%20m%C3%A9todos>

ECONOMIPEDIA. Distribución normal. [sitio web]. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://economipedia.com/definiciones/distribucion-normal.html>

EVTECH. La curva PF Mantenimiento Centrado en Fiabilidad RCM. [sitio web]. 25 de junio 2019. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://evtech.cl/la-curva-pf-mantenimiento-centrado-en-fiabilidad-rcm/>

F.S. NOWLAN, et al. Reliability Centered Maintenance. [en línea]. United Airlines San Francisco, California, 29 diciembre 1978. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.chemicalprocessing.com/assets/Media/MediaManager/Nowlan-Heap-Reliability-Centered-Maintenance-part1.pdf>

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL. Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos. [sitio web]. México. 26 de junio de 2018. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: [https://www.redalyc.org/journal/614/61458265006/html/#:~:text=Introducci%C3%B3n,El%20mantenimiento%20centrado%20en%20confiabilidad%20\(RCM%20por%20sus%20siglas%20en,de%20fallas%2C%20etc.\)](https://www.redalyc.org/journal/614/61458265006/html/#:~:text=Introducci%C3%B3n,El%20mantenimiento%20centrado%20en%20confiabilidad%20(RCM%20por%20sus%20siglas%20en,de%20fallas%2C%20etc.))

LI, Xiang, et al. Remaining Useful Life Estimation in Prognostics Using Deep Convolution Neural Networks. [Documento digital]. 2006. [Citado el: 13 de julio de 2022].

LOSADA, Miguel A. ROM 0.0: Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias, parte 1. [en línea]. 1 ed. España: Universidad de Granada, Ministerio de fomento, Madrid, 2001. [Citado el: 17 de enero de 2022]. Disponible en: <https://widispe.puertos.es/rom/storage/public/docROM/ROM%2000-01.pdf>

MYSQOL, TM. Inc. MySQL Enterprise Edition. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.mysql.com/products/enterprise/>

OCHELLA, Sunday, et al. Adopting machine learning and condition monitoring P-F curves in determining and prioritizing high-value assets for life extension. En: Expert Systems with Applications. ScienceDirect. [base de datos en línea]. 2021, vol. 176. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417421003389>

OXFORD LANGUAGES. Síntomas. [sitio web]. 2022. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://languages.oup.com/go-ogle-dictionary-es/>

OXFORD LANGUAGES. Técnico, ca. [sitio web]. 2022. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://languages.oup.com/google-dictionary-es/>

PÍLDORAS INFORMÁTICAS. Curso Python: Módulo 1. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.pildorasinformaticas.es/course/curso-python/>

PUBLICACIÓN DE ESTÁNDARES BSI. Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural — recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos, ISO 14224. [en línea]. Estándar Británico: 2016.

PLUCKNETTE, Douglas. Expandiendo la curva. Revista Uptime. [en línea]. junio/julio de 2006. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/416276351/Curva-P-F-docx>

PYTHON, TM. Python is powerful... and fast; plays well with others; runs everywhere; is friendly & easy to learn; is Open. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.python.org/about/>

RELIABILITYWEB.COM. Completing the Curve. [sitio web]. 25 de junio 2019. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://reliabilityweb.com/articles/entry/completing-the-curve>

SOLARWINDS. Monitoreo de desempeño de MySQL. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.solarwinds.com/es/database-performance-monitor/integrations/mysql-monitoring>

SOPORTE DE MINITAB. ¿Qué es la distribución normal? [sitio web]. [Citado el: 22 de enero de 2022]. Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/hel>

[p-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/what-is-the-normal-distribution/](https://www.mathworks.com/help/matlab/creating_plots/normality-what-is-the-normal-distribution/)

THE MATHWORKS, Inc. Introduction to Predictive Maintenance with MATLAB. [base de datos en línea]. 2019. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/ebook/gated/predictive-maintenance-ebook-all-chapters.pdf>

THE MATHWORKS, Inc. Mantenimiento predictive con Matlab. [base de datos en línea]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/campaigns/offers/predictive-maintenance-with-matlab.html>

THE MATHWORKS, Inc. Matemáticas: Gráficas. Programación. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

THE MATHWORKS, Inc. Predictive Maintenance Toolbox and Simulink. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/videos/predictive-maintenance-in-matlab-and-simulink-1498594477325.html>

THE MATHWORKS, Inc. Predictive Maintenance Toolbox. [sitio web]. 2021. [Citado el: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/predmain t/>

THE MATHWORKS, Inc. Predictive Maintenance Toolbox: Diseño y prube algoritmos de supervisión de condiciones y mantenimiento predictivo. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/predictive-maintenance.html>

THE MATHWORKS, Inc. Similarity-Based Remaining Useful Life Estimation. [sitio web]. 2022. [Citado el: 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>

VERGARA LAZCANO, Raquel. La Estadística en el Mantenimiento y Reemplazo Optimo en el Control de Calidad. [Documento digital]. Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias. México. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Febrero del 2014. [Citado el: 22 de enero de 2022]. Disponible en: <http://mat.izt.uam.mx/mcmai/documentos/tesis/Gen.11º/RAQUELVERGARALAZCANO.pdf>

WANG, Tianyi, et al. A Similarity-Based Prognostics Approach for Remaining Useful Life Estimation of Engineered Systems. [Documento digital]. 2006. [Citado el: 13 de julio de 2022].

YOUTUBE. Curva P-F del Mantenimiento – BIMAN. [sitio web]. 2019. [Citado el: 11 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=n-dkmWAqNsw>

ANEXOS

Anexo A. Normas de documentación

- Mantenimiento, Terminología del mantenimiento: Norma UNE EN 13306.
- Mantenimiento definiciones: Norma COVENIN 3049.
- Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM): SAE JA1011.

Anexo B. Definiciones

- Plan de mantenimiento: Conjunto estructurado y documentado de tareas que incluyen las actividades, los procedimientos, los recursos y la duración necesaria para realizar el mantenimiento. (UNE EN 13306)
- Mantenibilidad: Capacidad de un elemento bajo condiciones de utilización dadas, de ser preservado, o ser devuelto a un estado en el que pueda realizar una función requerida, cuando el mantenimiento se ejecuta bajo condiciones dadas y utilizando procedimientos y recursos establecidos. (UNE EN 13306)
- Vida útil: Intervalo de tiempo que comienza a partir del primer uso hasta el instante en que se alcanza el estado límite. (UNE EN 13306)
- Disponibilidad: Capacidad de un elemento de estar en un estado en el que puede cumplir una función de la manera y en el momento requeridos en las condiciones dadas, asumiendo que se proporcionan los recursos externos necesarios. (UNE EN 13306)
- Tasa media de fallos: Número de fallos de un elemento durante un intervalo de tiempo dado dividido por el intervalo de tiempo. (UNE EN 13306)
- Ciclo de vida: Serie de estados por los que pasa un elemento desde su concepción hasta su eliminación. (UNE EN 13306)

- Fallo: Cese de la aptitud de un elemento para realizar una función requerida. (UNE EN 13306)
- Degradación: Cambio perjudicial en la condición física del elemento que se produce por el tiempo, la utilización o por causas externas. (UNE EN 13306)
- Software MATLAB: sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Este lenguaje permite operaciones de vectores y matrices, funciones, cálculo lambda, y programación orientada a objetos. (The MathWorks, Inc.)
- Mantenimiento preventivo: “Mantenimiento llevado a cabo para evaluar y/o mitigar la degradación y reducir la probabilidad de fallo de un elemento.” (Norma UNE EN 13306, p.17)
- Mantenimiento basado en la condición: “Mantenimiento preventivo que incluye una combinación de la evaluación de las condiciones físicas, el análisis y las posibles acciones de mantenimiento posteriores.” (Norma UNE EN 13306, p.17)
- Mantenimiento predictivo: “Mantenimiento basado en la condición que se realiza siguiendo una predicción obtenida del análisis repetido o de características conocidas y de la evaluación de los parámetros significativos de la degradación del elemento.” (Norma UNE EN 13306, p.17)
- Mantenimiento correctivo: “Mantenimiento que se realiza después del reconocimiento de una avería y que está destinado a poner a un elemento en un estado en que pueda realizar una función requerida.” (Norma UNE EN 13306, p.17)
- Reliability Centred Maintenance (RCM): El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad también conocido como RCM por sus siglas en inglés, es una metodología que incluye todo tipo de estrategias de mantenimiento (preventivo, predictivo, búsqueda de fallas, etc.). Esta metodología fue desarrollada inicialmente por la industria comercial de aviación de los Estados Unidos para mejorar la seguridad y confiabilidad de sus equipos, fue definida por los empleados de la United Airlines Stanley Nowlan y Howard Heap en

1978, es una técnica de organización de las actividades y de la gestión del mantenimiento para desarrollar programas organizados que se basan en la confiabilidad de los equipos. (Instituto Politécnico Nacional, México, 2018)

Según (John Moubray, 1997) definió el RCM como un proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional.

La norma SAE JA1011 establece los criterios mínimos que debe cumplir una metodología para que pueda definirse como RCM; especifica que cualquier proceso de RCM debe asegurarse de responder satisfactoriamente las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de rendimiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
2. ¿De qué formas no realiza sus funciones?
3. ¿Cuál es la causa para que deje de cumplir su función?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre una falla?
5. ¿De qué forma impacta cada falla?
6. ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?
7. ¿Qué debe hacerse si no se puede predecir ni prevenir una falla?

Anexo C. Despliegue de la función calidad

Para el despliegue de la función calidad se busca transformar las necesidades del consumidor de manera que aporten no sólo calidad, sino que cumplan con las especificaciones y parámetros considerados para llevar a cabo la técnica.

MATRIZ CALIDAD

Tabla 5. Matriz de calidad con los requerimientos y especificaciones técnicas.

DESARROLLO DE LA FUNCION CALIDAD PARA LA "TÉCNICA DE IMPLEMENTACIÓN DE LA CURVA P-F"		ESPECIFICACIONES TÉCNICAS													
		Cumplimiento de la normativa de mantenimiento		Reducción de costos de desarrollo		Mejora a la confiabilidad		Reducción de la incertidumbre a la falla		Recurso informático acorde a la necesidad de la técnica		Creación de gráficos, ilustración de la curva.		Control de variables y parámetros	
REQUERIMIENTOS DEL CONSUMIDOR	Prioridad	DATO	PONDERADO	DATO	PONDERADO	DATO	PONDERADO	DATO	PONDERADO	DATO	PONDERADO	DATO	PONDERADO	DATO	PONDERADO
Simplicidad de manejo	2	1	2	1	2	1	2	1	2	9	18	9	18	1	2
Claridad	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	9	9	9	3	3
Aplicabilidad generalizada	6	3	18	9	54	1	6	1	6	1	6	1	6	1	6
Veracidad y confiabilidad	4	9	36	9	36	9	36	9	36	3	12	3	12	3	12
Costo	7	3	21	3	21	1	7	1	7	9	63	1	7	1	7
Obtención de resultados de forma inmediata	3	1	3	3	9	9	27	9	27	9	27	3	9	9	27
Optimización de recurso	5	3	15	1	5	9	45	1	5	1	5	1	5	1	5
TOTALES		96		128		124		84		140		66		62	
ORDEN		4		2		3		5		1		6		7	

Tipo de Relación	Valor
Relación fuerte	9
Relación moderada	3
Relación débil	1

Fuente. Elaboración propia.

Los ítems más relevantes del análisis propuesto son los a continuación mencionados:

- Recurso informático acorde a la necesidad de la técnica.
- Reducción de costos de desarrollo.

- Mejora la confiabilidad.

PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

Se pretende proponer una serie de posibles soluciones para desarrollar la técnica planteada, seleccionando una alternativa donde se analicé la manera más efectiva y óptima de llevar a cabo la realización de la técnica, es por eso por lo que dentro de las alternativas se sugieren distintos softwares mencionados a continuación.

Alternativa 1: Software Matlab.

Principalmente “MATLAB es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada por millones de ingenieros y científicos para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos”³⁹. Este software cuenta con “productos de gestión de mantenimiento que automatizan el seguimiento y programación de actividades de mantenimiento, permitiendo a las organizaciones de servicios operar de forma proactiva, reducir el tiempo de inactividad y aumentar la eficiencia operativa”⁴⁰.

Según The MathWorks⁴¹, uno de estos gestores es la Predictive Maintenance Toolbox™, que permite gestionar datos de sensores, diseñar indicadores de condición y estimar la vida útil restante (RUL) o calcular el tiempo hasta que se produzca la falla de una máquina. Esta Toolbox proporciona funciones y una app interactiva para explorar, extraer y clasificar características mediante técnicas basadas en datos y en modelos, incluidos análisis estadísticos, espectrales y de series temporales; otros puntos importantes es el uso de Big Data con simulaciones, la creación de prototipos, pruebas y perfeccionamiento de modelos

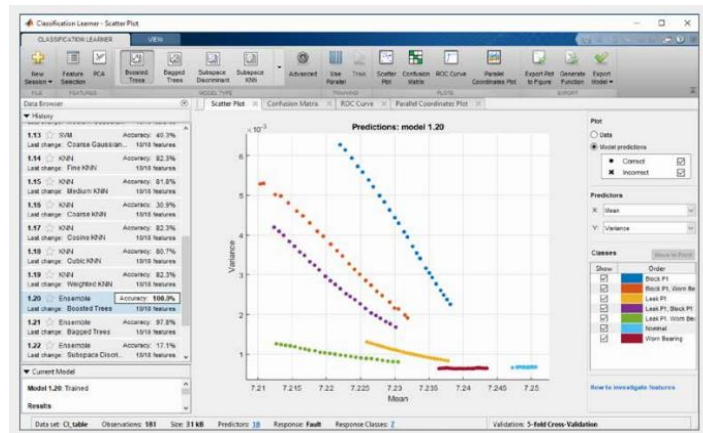
³⁹ THE MATHWORKS, Inc. Mantenimiento predictivo con Matlab. [base de datos en línea]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/campaigns/offers/predictive-maintenance-with-matlab.html>

⁴⁰ CAPTERRA. Software de gestión de mantenimiento. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.capterra.co/directory/30058/maintenance-management/software>

⁴¹ THE MATHWORKS, Inc. Mantenimiento predictivo con Matlab. [base de datos en línea]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/campaigns/offers/predictive-maintenance-with-matlab.html>

predictivos mediante métodos de aprendizaje automático y la combinación de técnicas de modelado físico y aprendizaje automático para el mantenimiento predictivo.

Figura 41. Interfaz Predictive Maintenance Toolbox.



Fuente. THE MATHWORKS, Inc. Mantenimiento predictivo con Matlab. [base de datos en línea]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/campaigns/offers/predictive-maintenance-with-matlab.html>

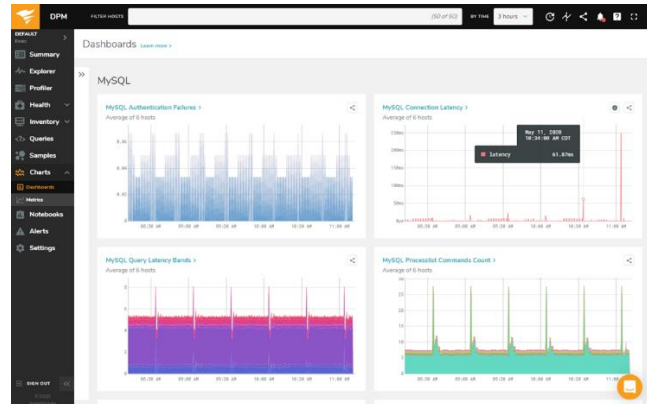
Alternativa 2: Software MySQL

Este software cuenta con determinadas ventajas que lo vuelven una herramienta llamativa y útil para los desarrolladores; la razón más evidente es que trabaja con bases de datos relacionales.

MySQL Enterprise Edition incluye el conjunto más completo de funciones avanzadas, herramientas de administración y soporte técnico para lograr los niveles más altos de escalabilidad, seguridad, confiabilidad y tiempo de actividad de MySQL. Reduce el riesgo, el costo y la complejidad en el desarrollo, implementación y administración de aplicaciones MySQL críticas para el negocio⁴².

⁴² MYSQOL, TM. Inc. MySQL Enterprise Edition. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.mysql.com/products/enterprise/>

Figura 42. Interfaz MySQL Enterprise Edition.



Fuente. SOLARWINDS. Monitoreo de desempeño de MySQL. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.solarwinds.com/es/database-performance-monitor/integrations/mysql-monitoring>

Alternativa 3: Software PYTHON

Python es un lenguaje multiparadigma que permite la programación orientada a objetos con bloques multifuncionales, dinámico y de multiplataforma, igualmente el uso de data mining y machine learning que son librerías útiles para este tipo de tareas “Python está desarrollado bajo una licencia de código abierto aprobada por OSI, lo que lo hace de libre uso y distribución, incluso para uso comercial”⁴³, cuenta además con una herramienta llamada Python para estadística, por lo que existen múltiples programadores que crean librerías para el análisis estadístico y a su vez, se puede implementar en sistemas de producción, como predicciones en tiempo real.

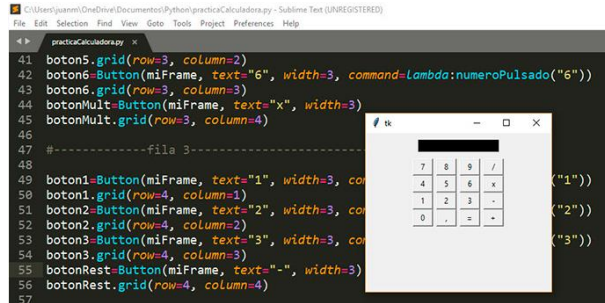
Para el desarrollo de la técnica en específico se usaría en caso de ser la alternativa seleccionada los siguientes recursos (Python. TM, 2022):

- Funciones Básicas de Estadística.
- Análisis estadístico con Python y statsmodels.

⁴³ PYTHON, TM. Python is powerful... and fast; plays well with others; runs everywhere; is friendly & easy to learn; is Open. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.python.org/about/>

- Regresión lineal con Python y statsmodels.
- Modelos lineales generalizados con Python y statsmodels.

Figura 43. Interfaz Python.



Fuente. PÍLDORAS INFORMÁTICAS. Curso Python: Módulo 1. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.pildorasinformaticas.es/course/curso-python/>

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

A continuación, se presentan las alternativas de solución y la selección teniendo en cuenta los parámetros priorizados en la gráfica de QFD y las ventajas de cada uno de los softwares evaluados los aspectos mencionados en la Tabla 2, esto nos permite de manera crítica elegir el producto más indicado para la realización de la técnica, arrojando como la mejor selección al software Matlab.

Tabla 6. Evaluación de las alternativas de software.

	Prioridad %	ALTERNATIVAS					
		Matlab		Python		MySQL	
Recurso informático acorde a la necesidad de la técnica	40%	5	2	3	1,2	4	1,6
Reducción de costos de desarrollo	20%	4	0,8	5	1	3	0,6
Mejora a la confiabilidad	30%	5	1,5	2	0,6	1	0,3
Cumplimiento de la normativa de mantenimiento	10%	4	0,4	3	0,3	3	0,3
TOTAL			4,7		3,1		2,8

Fuente. Elaboración propia

Anexo D. Diseño metodológico

TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto se acoge bajo el criterio de una investigación con enfoque mixto al reunir características tanto del enfoque cuantitativo, como cualitativo, ayudando tanto para el planteamiento de la técnica como a su vez en el impacto que puede surgir en la sociedad o el sector industrial.

Para esta investigación se debe tener claro el propósito del proyecto, los datos para tener en cuenta y la solución esperada, sin embargo, no se debe afirmar una solución total o de alto impacto ya que no hay antecedentes locales sobre el tema. Este trabajo se constituye por una investigación de tipo exploratoria, ya que el tema seleccionado cuenta con muy poco material bibliográfico e investigativo.

POBLACIÓN

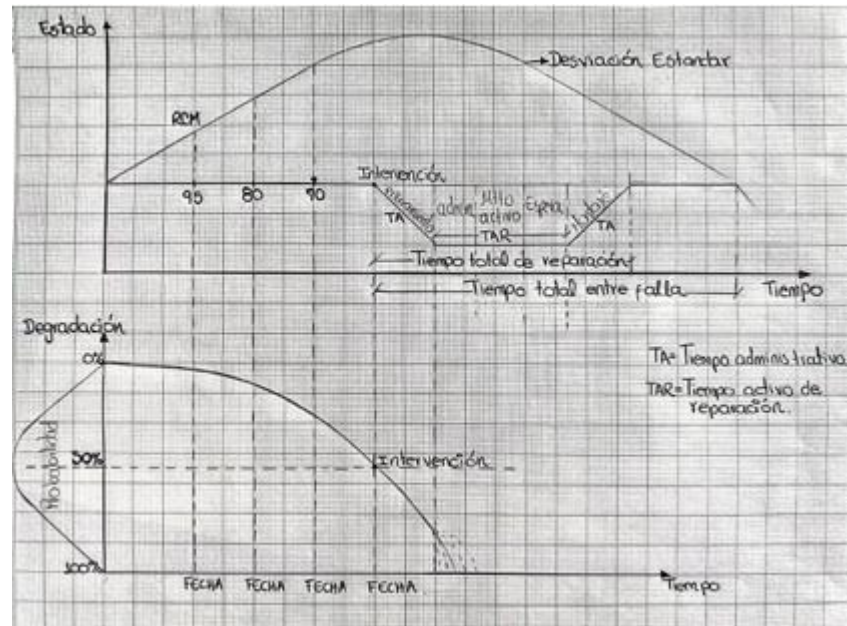
La población seleccionada son las industrias, departamentos o similares que se vean relacionados con el área de mantenimiento, enfocada en equipos, máquinas, etc. Aportando una innovación y evolución al aplicar una nueva técnica para realizar dicha labor y monitorear la vida útil de los activos.

GESTIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

El estudio bibliométrico se llevó a cabo en el proceso del capítulo anterior, donde se recolectó y se analizó todos los antecedentes y referentes necesarios para proponer el avance, posteriormente se establecen los parámetros de degradación y tiempo de los equipos para expresarlos en la curva de probabilidad de falla (P-F) ilustrado en la figura 8, donde contemplamos la gráfica de tiempos de

mantenimiento a la cual se le aplica una desviación estándar y a partir de esta se lleva a la gráfica de probabilidad de falla.

Figura 44. Curva P-F y de distribución de tiempo



Fuente. Elaboración propia

Todo esto se logra con medidas de falla obtenidas de los datos del equipo, que pueden estar estructurados o no estructurados y residir en múltiples fuentes, como archivos locales, la nube o bases de datos del activo, por lo que se puede acceder a ellos con MATLAB®; Cuando no se tienen suficientes datos de fallas, se puede generar desde un Simulink® un modelo del equipo de su máquina inyectando fallas de señal y modelando la dinámica de falla del sistema. Predictive Maintenance Toolbox™, contiene funciones adicionales para calcular características en el dominio del tiempo⁴⁴.

⁴⁴ THE MATHWORKS, Inc. Predictive Maintenance Toolbox and Simulink. [sitio web]. 2022. [Citado el: 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/videos/predictive-maintenance-in-matlab-and-simulink-1498594477325.html>

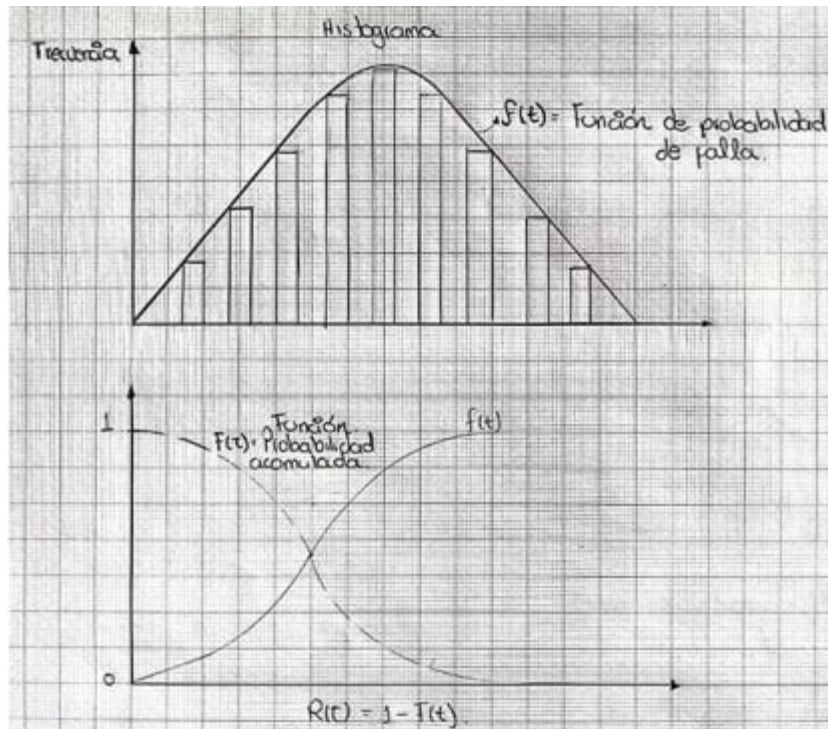
Con las medidas de fallo ya cargadas y analizadas por el software, se procede a apoyarse del histograma, esta herramienta facilita la obtención de una función de probabilidad de falla $f(t)$ con la que se graficará la curva probabilidad acumulada $F(t)$ como se muestra en la figura 9, de igual forma se puede obtener el reliability formulando $1-F(t)$.

Para desarrollar el algoritmo de mantenimiento predictivo en la Toolbox es necesario identificar algunos indicadores de estado que son características de los datos del sistema, cuyo comportamiento cambia de manera predecible a medida que este se degrada. La verdadera ventaja es que nos ayudará a distinguir el funcionamiento normal del anormal; al extraer los datos, este los usa para la clasificación de fallas y la estimación de la vida útil restante (RUL), al identificar las frecuencias de falla máximas estas pueden servir como parámetro o indicadores de condición, que pueden ser graficadas como se observa en la curva de la figura 8.

Se procederá entonces a proponer múltiples diseños de algoritmos donde se obtenga el más efectivo y más cercano al propósito planteado; como para algunos sistemas, las características estadísticas simples de las señales de tiempo pueden servir como indicadores de condición, se tendrá en cuenta el valor promedio que tiene la señal en particular o su desviación estándar, porque puede cambiar a medida que se degrada la salud del sistema por lo que se puede intentar identificar valores de umbral que distinguen el funcionamiento sano del que no lo es, o buscar cambios bruscos en el estado del sistema.

Por último, se buscará una posible validación del modelo al ejecutarlo en el software propuesto o con parámetros de operación; que ratifican la utilidad y el uso de la técnica en cualquier tipo de activo que se requiera o se desee aplicar, luego se procederá a recolectar y almacenar los resultados obtenidos del proyecto de investigación que servirán para una realimentación futura.

Figura 45. Función probabilidad acumulada e histograma



Fuente. Elaboración propia

Identificación de tareas y subtareas

Las fases de desarrollo de este proyecto se encuentran distribuidas de la siguiente forma:

Fase 1: Elaboración de la técnica

- Determinación de entradas y salidas para la técnica.
- Análisis del proceso de cálculo necesario para cada componente.
- Cálculo de variables mediante análisis de componentes principales (PCA).
- Elaboración de esquemas de programación en el software Predictive Maintenance Toolbox de Matlab.

Tiempo requerido: 8 semanas.

Fase 2: Validación y ajuste de la técnica

- Realización de pruebas de funcionamiento del código de programación.
- Verificación y reformulación de la alternativa seleccionada de ser necesario.
- Análisis de los resultados.
- Conclusiones y observaciones.

Tiempo requerido: 5 semanas.

Fase 3: Preparación de memorias

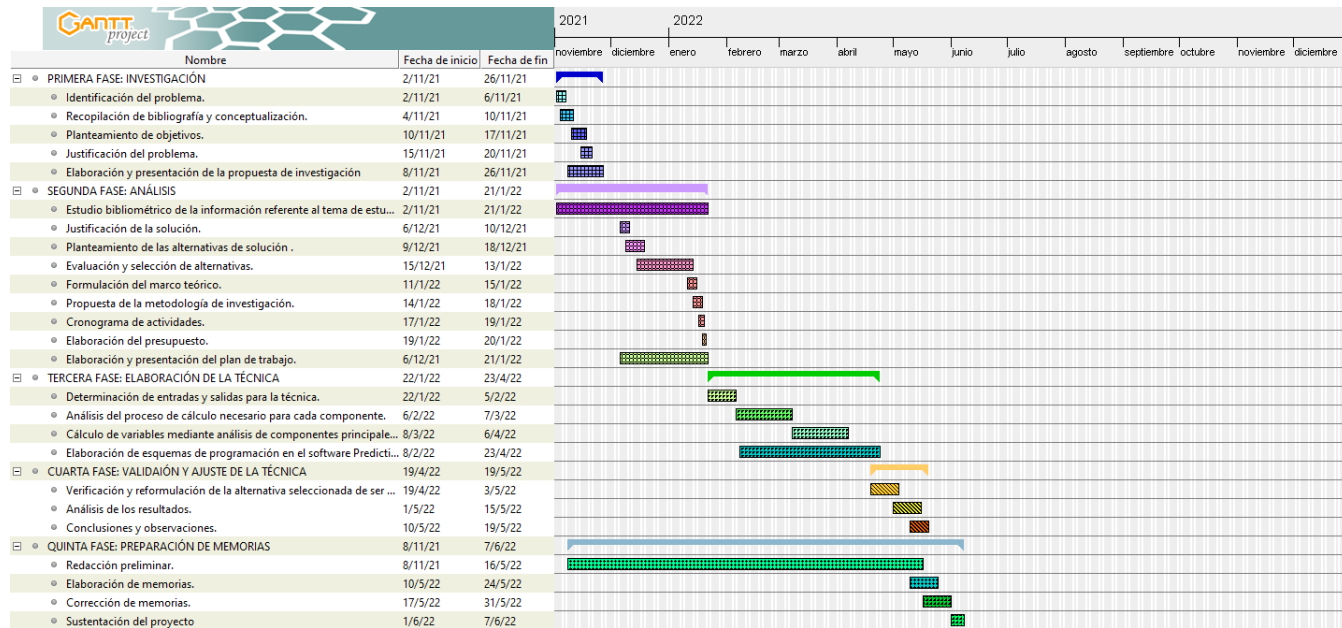
La documentación se elabora a lo largo del desarrollo del propio proyecto.

- Redacción preliminar.
- Elaboración de memorias.
- Corrección de memorias.
- Sustentación del proyecto.

Tiempo requerido: 3 semanas.

Anexo E. Cronograma

Tabla 7. Evaluación de las alternativas de software.



Fuente. Elaboración propia

Para la realización del cronograma que registrará el progreso del proyecto, se optó por aplicar el método del diagrama de Gantt, constituida por una herramienta gráfica, de gran ayuda, fácil manejo y útil a la hora de planificar cualquier proyecto. Esta investigación tiene como fecha de inicio el 02/11/2021 y su culminación en la finalización del primer periodo 2022-1, adquiriendo 32 semanas en total para la cúspide de este.

Anexo F. Presupuesto

Es de vital importancia hacer un análisis minucioso y detallado de los gastos, al omitir alguno o pensar resolverlo en el transcurso del proyecto pueden generar retrasos importantes en la investigación, pérdidas económicas e incluso evitar que este concluya. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se propone a continuación el presupuesto para el desarrollo de la propuesta de investigación planteada en este proyecto.

Tabla 8. Presupuesto general del proyecto de investigación.

PRESUPUESTO GENERAL DEL PROYECTO						
SOFTWARE						
Concepto	Descripción	Financiación	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Software	Matlab	UIS	Año	1	\$ 222.051,50	\$ 222.051,50
Software	Microsoft Office 361	UIS	Año	1	\$ 509.999,00	\$ 509.999,00
EQUIPOS						
Concepto	Descripción	Financiación	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Equipos de computo	Compra de portatiles	Estudiantes	Cantidad	2	\$ 2.500.000,00	\$ 5.000.000,00
BIBLIOGRAFÍA						
Concepto	Descripción	Financiación	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Plataformas digitales	Biblioteca virtual	UIS	Cantidad	2	\$ 600.000,00	\$ 1.200.000,00
Libro	ROM 0.0	Estudiantes	Cantidad	1	\$ 121.119,00	\$ 121.119,00
RECURSOS HUMANOS						
Concepto	Descripción	Financiación	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Propiedad intelectual	Conocimientos	Estudiantes	Horas	900	\$ 30.000,00	\$ 27.000.000,00
Director de proyecto	Especialista en el área	UIS	Horas	32	\$ 305.000,00	\$ 9.760.000,00
Asesorías profesionales	Especialistas en PCA y Matlab	Estudiantes	Horas	80	\$ 40.000,00	\$ 3.200.000,00
BÁSICO						
Concepto	Descripción	Financiación	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Papelería	Hojas, lápiz, calculadora, etc.	Estudiantes	Cantidad	1	\$ 100.000,00	\$ 100.000,00
VARIOS						
Concepto	Descripción	Financiación	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Seguro	Poliza UIS	Estudiantes	Cantidad	2	\$ 16.500,00	\$ 33.000,00
Electricidad	Gasto	Estudiantes	\$/Kwh	900	\$ 560,94	\$ 504.846,00
Internet	Gasto	Estudiantes	Mes	8	\$ 60.000,00	\$ 480.000,00
Viaticos	Hospedaje y alimentación	Estudiantes	Cantidad	2	\$ 850.000,00	\$ 1.700.000,00
Subtotal (Universidad)					\$	11.692.050,50
Subtotal (Autores)					\$	38.138.965,00
Costo parcial del proyecto					\$	49.831.015,50
Imprevistos 10%					\$	4.983.101,55
Costo total (COP)					\$	54.814.117,05

Fuente. Elaboración propia.

Anexo G. Método de deducción para la ecuación lineal de regresión, Weibull

Para poder realizar la distribución de Weibull, necesitamos tener claro algunos conceptos y deducciones matemáticas.

La función acumulativa de Weibull:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}; \text{ Ecuación 1}$$

Paso 1. Se realizará los arreglos algebraicos, se tiene:

$$F(t) = 1 - \frac{1}{e^{\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}} \Rightarrow 1 - F(t) = \frac{1}{e^{\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}} \Rightarrow$$
$$\frac{1}{1 - F(t)} = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}; \text{ Ecuación 2}$$

Paso 2. Se aplicará logaritmo natural a ambos miembros de la ecuación 2:

$$\ln\left[\frac{1}{1 - F(t)}\right] = \ln\left[e^{\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}\right] \Rightarrow \ln\left[\frac{1}{1 - F(t)}\right] = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta; \text{ Ecuación 3}$$

Paso 3. Nuevamente se aplica logaritmo natural en ambos miembros de la ecuación 3:

$$\ln\left[\ln\left[\frac{1}{1 - F(t)}\right]\right] = \ln\left[\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \Rightarrow \ln\left[\ln\left[\frac{1}{1 - F(t)}\right]\right] = \beta * \ln\left[\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)\right]; \text{ Ecuación 4}$$

Paso 4. Finalmente se tiene una ecuación linealizada que representa una ecuación lineal

$$\ln\left[\ln\left[\frac{1}{1 - F(t)}\right]\right] = \beta * \ln[t - \gamma] - \beta * \ln[\eta]; \text{ Ecuación 5}$$

$$y = mx - b; \text{ Ecuación 6}$$

Paso 5. Donde podemos identificar que:

- $y = \ln\left[\ln\left[\frac{1}{1 - F(t)}\right]\right]; \text{ Ecuación 7}$
- $m = \beta; \text{ Ecuación 8}$
- $x = \ln[t - \gamma]; \text{ Ecuación 9}$
- $b = -\beta * \ln[\eta]; ; \text{ Ecuación 10}$

Paso 6. Si despejamos η , tendremos que:

$$b = -\beta * \ln[\eta] \Rightarrow \eta = e^{-\frac{b}{\beta}}; \text{ Ecuación 11}$$

Ahora si utilizamos el método de los rangos medianos de Bernard, $F(i)$, para número de datos mayor que 20.

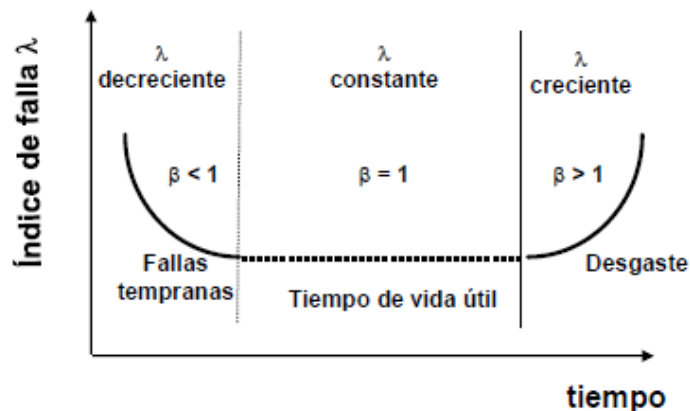
$$F(i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}; \text{ Ecuación 12}$$

Donde:

- $F(t)$ = Función de distribución acumulada
- t = Tiempo de falla
- η = Característica de vida parámetro escala
- β = Parámetro de forma o pendiente.
- γ = Parámetro de localización
- n = Número de datos de falla

Dadas todas las ecuaciones, se puede implementar la distribución, uno de los datos más relevantes que nos brinda el método es β , quien nos indica donde estamos ubicados en la curva de la bañera y la clase de falla.

Figura 46. Curva de la bañera



Fuente: Plataforma Moodle, asignatura ingeniería de mantenimiento, PDF de indicadores

$\beta < 1$, disminuye la tasa de riesgo, implica mortalidad infantil

- Si esto ocurre, puede existir:

- Carga, inspección o prueba inadecuada.
- Problemas de manufactura.
- Problemas de reparación.
- Si un componente sobrevive la mortalidad infantil, la resistencia a fallar mejora con la edad

$\beta = 1$, tasa de riesgo constante, fallas aleatorias

- Implica fallas aleatorias (Distribución Exponencial)
- Una parte vieja es tan buena como una nueva...
- Si esto ocurre, puede existir:
 - Mezcla de modos de falla.
 - Las fallas pueden deberse a eventos externos, como errores humanos
 - Fundido y removido antes de su desgaste

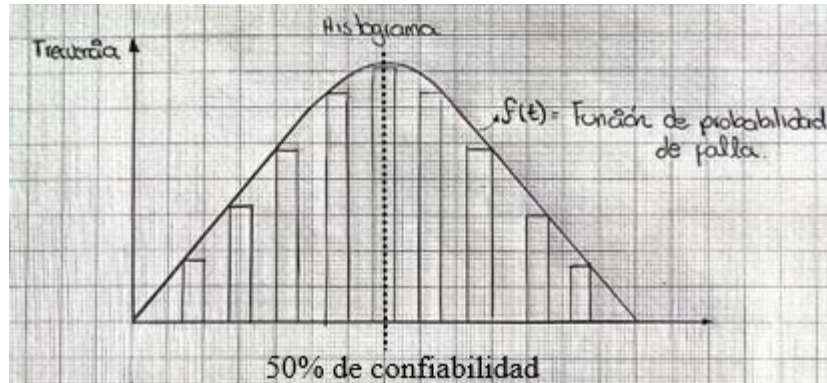
$1 < \beta < 4$, aumenta la tasa de riesgo, fallas por corrosión, erosión

- Si esto ocurre, puede existir:
 - La mayoría de los baleros y engranes fallan.
 - Corrosión o erosión.
 - El reemplazo programado puede ser efectivo en costo.

$\beta > 4$, aumenta rápidamente la tasa de riesgo, implica fallas por desgaste y envejecimiento

- Implica edad avanzada y rápido desgaste
- Si esto ocurre, puede existir:
 - Propiedades del material.
 - Materiales frágiles como la cerámica.
 - Variabilidad pequeña en manufactura o material.

Figura 47. Función densidad de probabilidad e histograma.



Fuente. Elaboración propia

Anexo H. Ejemplo 2: Base de datos compresor de gas natural

Aplicación de la distribución Weibull

Se asume el mismo procedimiento que se ejecutó en el ejemplo anterior, aplicando las ecuaciones del capítulo 7.2.2.1. (Método de deducción para la ecuación lineal de regresión, Weibull) se utilizará una base de datos propuesta bajo el contexto de la asignatura ingeniería de mantenimiento referente a un compresor de gas natural⁴⁵, la cual la podemos encontrar en el anexo J y se ilustra en la tabla 9.

A continuación, se analizaron los datos facilitados de la historia del equipo, donde nos referencian un registro de 40 datos, en un periodo de tiempo que oscilaba entre el 28/05/1997 y el 22/06/2006. Entre los datos encontramos la fecha de solicitud, la fecha de cumplimiento, el tiempo entre fallas - TBF (Días) y el tiempo entre reparaciones - TTR (Días), esta información se almacena en una hoja de cálculo Microsoft Excel, y se ordena de acuerdo con los tiempos entre fallas de tal forma que queden de manera ascendente, es decir de menor a mayor.

⁴⁵ Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [Microsoft Excel], 1 hoja de cálculo, color

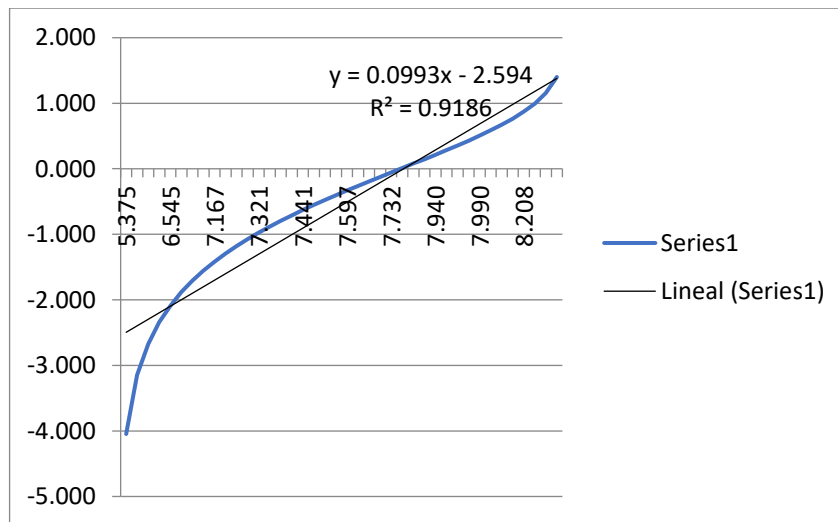
Tabla 9. Data del compresor de gas natural

No dato	Fecha Falla	TBF (horas) ti	TTR (horas) Tiempo entre reparación	Rm	xi = Ln(ti)	yi = Ln(-Ln(1-Rm))	$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right]$ Confiabilidad	xi^2	yi^2	xi*yi
1	22/6/1998	216	24	0.017	5.375	-4.047	0.988	28.894	16.376	-21.753
2	28/5/1997	432	24	0.042	6.068	-3.147	0.957	36.826	9.902	-19.096
3	12/12/1998	648	24	0.067	6.474	-2.671	0.912	41.911	7.135	-17.293
4	25/6/2003	672	24	0.092	6.510	-2.343	0.906	42.383	5.489	-15.253
5	11/5/1998	696	24	0.116	6.545	-2.090	0.900	42.842	4.368	-13.680
6	12/6/1998	720	24	0.141	6.579	-1.883	0.894	43.287	3.547	-12.391
7	12/3/1997	768	24	0.166	6.644	-1.707	0.881	44.140	2.915	-11.344
8	16/12/2000	1224	24	0.191	7.110	-1.554	0.744	50.550	2.414	-11.047
9	22/10/2005	1296	24	0.215	7.167	-1.417	0.720	51.366	2.007	-10.154
10	16/5/1999	1344	24	0.240	7.203	-1.293	0.704	51.889	1.671	-9.311
11	12/5/1997	1440	24	0.265	7.272	-1.179	0.672	52.888	1.389	-8.572
12	22/12/1997	1440	24	0.290	7.272	-1.073	0.672	52.888	1.152	-7.804
13	28/3/2006	1512	24	0.314	7.321	-0.974	0.647	53.600	0.950	-7.134
14	17/5/2005	1656	24	0.339	7.412	-0.881	0.599	54.940	0.777	-6.534
15	29/12/2005	1656	24	0.364	7.412	-0.793	0.599	54.940	0.629	-5.880
16	15/12/2004	1680	24	0.389	7.427	-0.709	0.590	55.154	0.503	-5.267
17	26/5/2003	1704	24	0.413	7.441	-0.629	0.582	55.365	0.395	-4.677
18	8/12/2003	1704	24	0.438	7.441	-0.551	0.582	55.365	0.303	-4.099
19	24/9/2004	1704	24	0.463	7.441	-0.476	0.582	55.365	0.226	-3.539
20	12/4/1998	1920	24	0.488	7.560	-0.402	0.511	57.155	0.162	-3.042

Fuente: Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [Microsoft Excel], 1 hoja de cálculo, color

Aplicamos la distribución de Weibull, ejecutando las mismas ecuaciones y el mismo orden como se hizo en el ejemplo 1.

Figura 48. Distribución Weibull



Fuente: Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [Microsoft Excel], 1 hoja de cálculo, color

De la figura 48 y la tabla 9, se pueden deducir los siguientes datos concluyentes.

Tabla 10. Resumen de la toma de datos

Fecha de inicio operación	28/5/1997
Fecha final de análisis	22/6/2006
MTBF (horas)	1,963
MTBF (días)	81.80
No. De fallas	40
Tiempo total de análisis (horas)	79,488
TTR (horas)	960
Tiempo operación efectivo (horas)	78,528
Beta gráfico regresión lineal	0.0993
Beta mínimos cuadrados	1.8255
Intercepto b (-Beta*Ln n)	- 14.1980

Fuente. Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [Microsoft Excel], 1 hoja de cálculo, color

Hasta el momento estos valores obtenidos no nos aportan nada a nuestra técnica, pero sí dice mucho de los datos en estudio, arrojando como primera conclusión que $\beta < 1$, disminuye la tasa de riesgo, lo cual implica una mortalidad infantil.

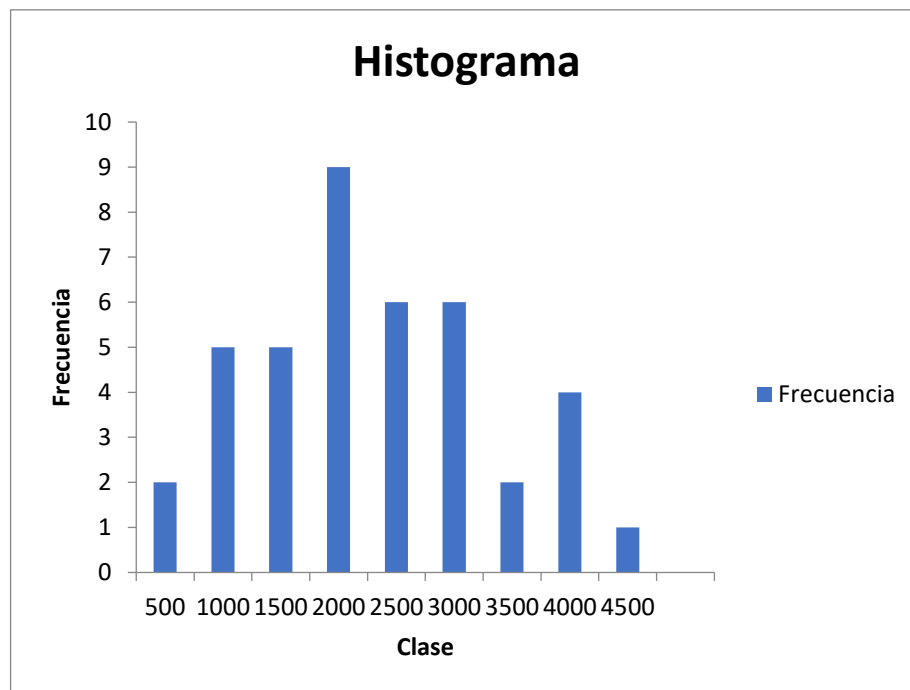
Tabla 11. Tabla de fiabilidad

<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>
500	2
1000	5
1500	5
2000	9
2500	6
3000	6
3500	2
4000	4
4500	1

Fuente. Universidad Industrial de Santander, asignatura ingeniería de mantenimiento, [Microsoft Excel], 1 hoja de cálculo, color

Ahora se realiza la tabla de fiabilidad, la cual si requerimos y es de nuestro mayor interés. Usando como clase el tiempo entre fallas, oscilando de 500 en 500 (Horas), y como frecuencia la cantidad de fallas presentes en cada periodo de tiempo correspondiente. A partir de la tabla 12 se puede realizar el diagrama de barras o histograma para los datos obtenidos.

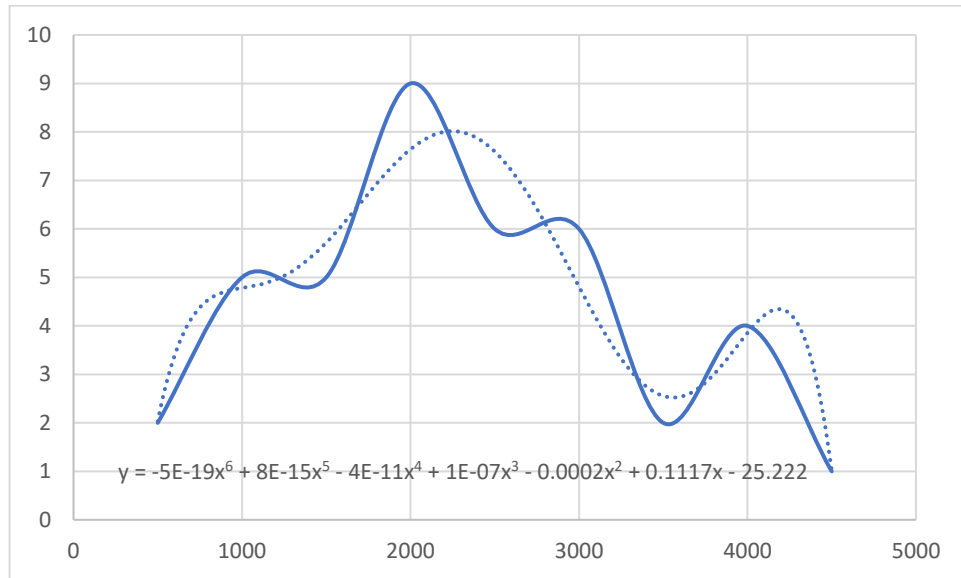
Figura 49. Histograma Weibull



Fuente. Elaboración propia

Con el fin de obtener del histograma la función de densidad de probabilidad, se opta por cambiar a un gráfico de dispersión y obtener una línea de tendencia, de esta forma se determina la ecuación de la función deseada y se prosigue a realizar el análisis del histograma, determinando su media con ayuda de la ecuación 13, y según la data propuesta.

Figura 50. Histograma en forma de gráfico de dispersión



Fuente. Elaboración propia

Se realiza el cálculo de la media, utilizando la figura 18 como se planteó anteriormente.

$$\text{Media estimada; } m = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}; \text{ Ecuación 13}$$

$$m = \frac{83168}{40} = 2079.2 \text{ [Horas]}$$

Por lo tanto, el 50% de confiabilidad se encuentra cuando el tiempo entre fallas es de 2079.2 horas, al revisar la data propuesta se puede determinar que en la línea de tiempo este punto se encuentra ubicado en la hora 28464 de 83168 de operación, también podemos deducir que:

Figura 51. Tiempo Vs % de confiabilidad

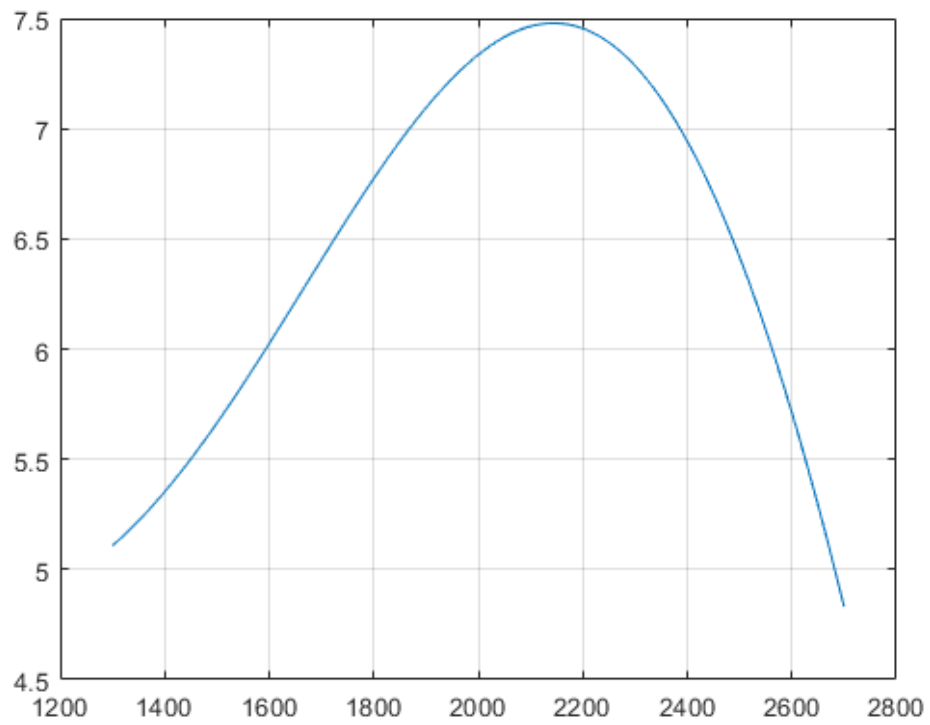
Tiempo (Días)	% de confiabilidad
0	100
5692.8	90
11385.6	80
17078.4	70
22771.2	60
28464	50
39404.8	40
50345.6	30
61286.4	20
72227.2	10
83168	0

Fuente. Elaboración propia

A continuación, se procede a ingresar la ecuación de la función de densidad de probabilidad en el software Matlab para realizar su respectiva integración y de esta forma determinamos la función de distribución acumulada. La función se define bajo la siguiente ecuación.

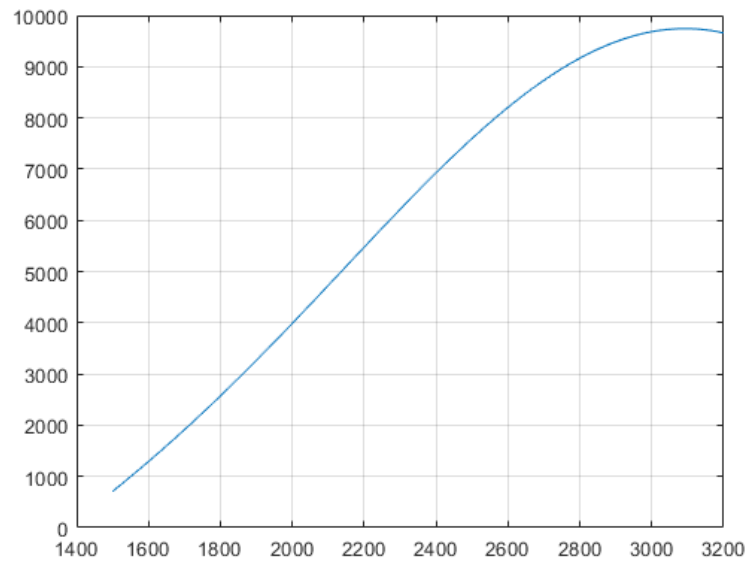
$$f(t) = -5E - 19x6 + 8E - 15x5 - 4E - 11x4 + 1E - 07x3 - 0.0002x2 + 0.1117x - 25.222; \text{ Ecuación 16}$$

Figura 52. Función de Densidad de Probabilidad



Fuente. Elaboración propia

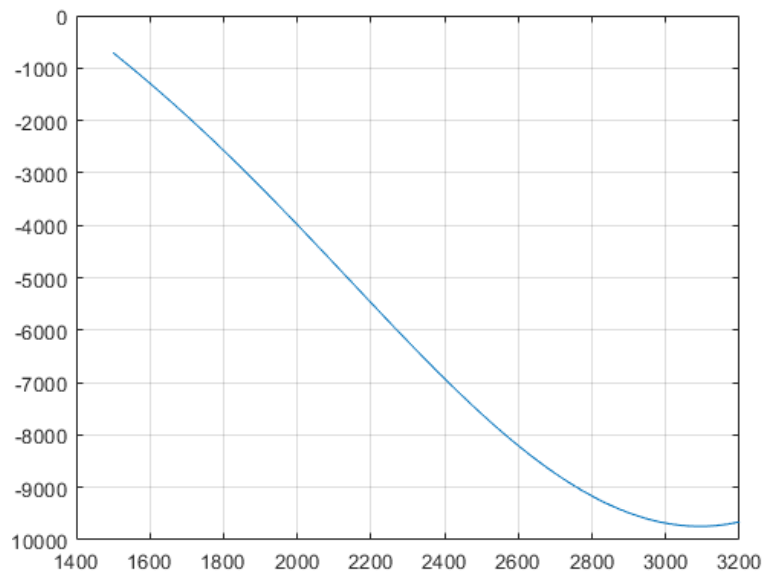
Figura 53. Función de Distribución Acumulada



Fuente. Elaboración propia

Como último paso se procede a determinar la función de confiabilidad, que resulta al expresarla como $1 -$ la función de distribución acumulada.

Figura 54. Función de confiabilidad

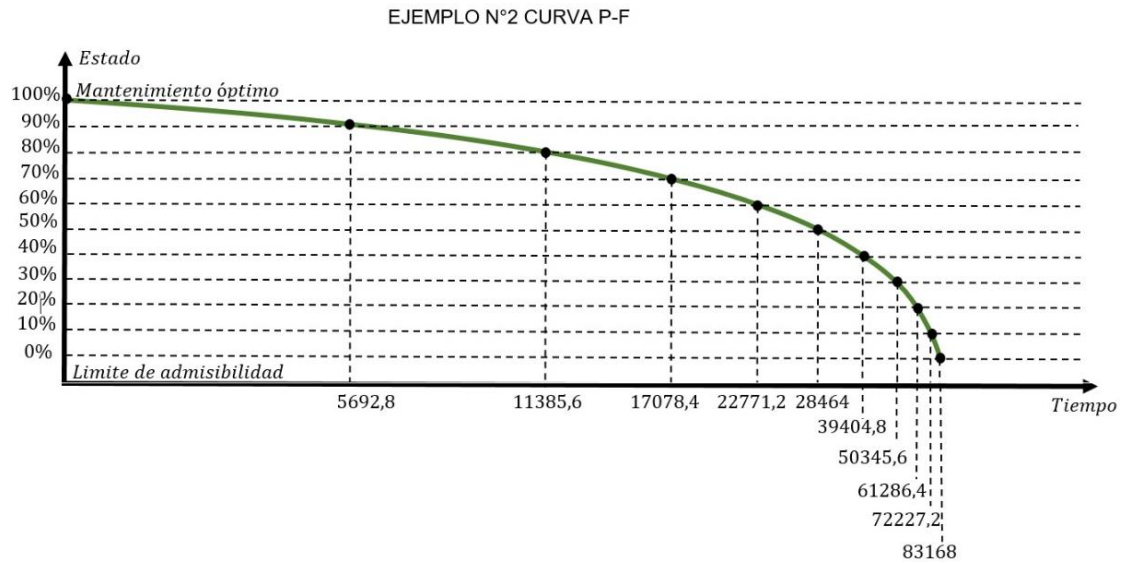


Fuente. Elaboración propia

Gráfica (P-F)

La gráfica (P-F), se puede construir asignando coordenadas, combinando los datos de frecuencia de monitoreo (eje x), con el análisis de confiabilidad realizado en el histograma (eje y), obteniendo la coordenada del punto de interés. De esta forma se puede crear coordenadas para la condición del activo en cualquier punto de monitoreo, como se hizo en el ejemplo anterior; se debe tener presente los límites permisibles para identificar en que instante aparece el dominio o zona correctiva o síntomas (intervalo P-F).

Figura 55. Construcción de la curva P.F mediante coordenadas



Fuente. Elaboración propia

Anexo I. Base de datos para el ejemplo 1

N° DATO	FECHA	CUMPLIMIENTO	TBF (DIAS) Tiempo entre fallas	TTR (DIAS) Tiempo entre reparación	RM(t)	X=ln (t)	Y=Ln(Ln(1/(1-RM(t))))
1	31/1/2010	31/1/2010	1	1	0.0024	3.17805	- 6.012841
2	7/5/2010	7/5/2010	1	1	0.0059	3.17805	- 5.123786
3	10/7/2010	10/7/2010	1	1	0.0094	3.17805	- 4.659405
4	30/7/2010	30/7/2010	1	1	0.0129	3.17805	- 4.342562
5	3/9/2010	3/9/2010	1	1	0.0164	3.17805	- 4.101565
6	13/9/2010	13/9/2010	1	1	0.0199	3.17805	- 3.906889
7	14/9/2010	14/9/2010	1	1	0.0234	3.17805	- 3.743469
8	14/9/2010	14/9/2010	1	1	0.0269	3.17805	- 3.602573
9	3/2/2011	3/2/2011	1	1	0.0304	3.17805	- 3.478682
10	7/2/2011	7/2/2011	1	1	0.0339	3.17805	- 3.368085
11	11/3/2011	11/3/2011	1	1	0.0374	3.17805	- 3.268168
12	14/3/2011	14/3/2011	1	1	0.0409	3.17805	- 3.177018
13	15/3/2011	15/3/2011	1	1	0.0443	3.17805	- 3.093195
14	15/3/2011	15/3/2011	1	1	0.0478	3.17805	- 3.015585
15	18/4/2011	18/4/2011	1	1	0.0513	3.17805	- 2.943312
16	21/6/2011	21/6/2011	1	1	0.0548	3.17805	- 2.875672
17	1/8/2011	1/8/2011	1	1	0.0583	3.17805	- 2.812092
18	2/8/2011	2/8/2011	1	1	0.0618	3.17805	- 2.752097
19	26/11/2011	26/11/2011	1	1	0.0653	3.17805	- 2.695295
20	29/12/2011	29/12/2011	1	1	0.0688	3.17805	- 2.641350
21	9/4/2012	9/4/2012	1	1	0.0723	3.17805	- 2.589979
22	9/4/2012	9/4/2012	1	1	0.0758	3.17805	- 2.540940
23	22/5/2012	22/5/2012	1	1	0.0793	3.17805	- 2.494020
24	4/6/2012	4/6/2012	1	1	0.0828	3.17805	- 2.449037

25	20/6/2012	20/6/2012	1	1	0.0862	3.17805	-	2.405830
26	2/8/2012	2/8/2012	1	1	0.0897	3.17805	-	2.364257
27	28/8/2012	28/8/2012	1	1	0.0932	3.17805	-	2.324194
28	21/11/2012	21/11/2012	1	1	0.0967	3.17805	-	2.285528
29	26/2/2013	26/2/2013	1	1	0.1002	3.17805	-	2.248160
30	30/4/2014	30/4/2014	1	1	0.1037	3.17805	-	2.212001
31	22/5/2014	22/5/2014	1	1	0.1072	3.17805	-	2.176970
32	22/5/2014	22/5/2014	1	1	0.1107	3.17805	-	2.142994
33	12/1/2010	12/1/2010	2	1	0.1142	3.87120	-	2.110008
34	13/1/2010	13/1/2010	2	1	0.1177	3.87120	-	2.077951
35	24/1/2010	24/1/2010	2	1	0.1212	3.87120	-	2.046769
36	25/1/2010	25/1/2010	2	1	0.1247	3.87120	-	2.016411
37	26/4/2010	26/4/2010	2	1	0.1281	3.87120	-	1.986831
38	11/5/2010	11/5/2010	2	1	0.1316	3.87120	-	1.957988
39	26/5/2010	26/5/2010	2	1	0.1351	3.87120	-	1.929842
40	23/8/2010	23/8/2010	2	1	0.1386	3.87120	-	1.902358
41	2/9/2010	2/9/2010	2	1	0.1421	3.87120	-	1.875501
42	9/9/2010	9/9/2010	2	1	0.1456	3.87120	-	1.849242
43	13/9/2010	13/9/2010	2	1	0.1491	3.87120	-	1.823551
44	14/9/2010	14/9/2010	2	1	0.1526	3.87120	-	1.798402
45	15/9/2010	15/9/2010	2	1	0.1561	3.87120	-	1.773769
46	25/10/2010	25/10/2010	2	1	0.1596	3.87120	-	1.749631
47	17/1/2011	17/1/2011	2	1	0.1631	3.87120	-	1.725964
48	18/1/2011	18/1/2011	2	1	0.1666	3.87120	-	1.702750
49	11/3/2011	11/3/2011	2	1	0.1700	3.87120	-	1.679967
50	14/3/2011	14/3/2011	2	1	0.1735	3.87120	-	1.657600
51	18/4/2011	18/4/2011	2	1	0.1770	3.87120	-	1.635630
52	7/6/2011	7/6/2011	2	1	0.1805	3.87120	-	1.614042
53	13/6/2011	13/6/2011	2	1	0.1840	3.87120	-	1.592821
54	1/8/2011	1/8/2011	2	1	0.1875	3.87120	-	1.571953
55	2/8/2011	2/8/2011	2	1	0.1910	3.87120	-	1.551424
56	5/8/2011	5/8/2011	2	1	0.1945	3.87120	-	1.531222
57	11/8/2011	11/8/2011	2	1	0.1980	3.87120	-	1.511335
58	15/9/2011	15/9/2011	2	1	0.2015	3.87120	-	1.491751
59	6/10/2011	6/10/2011	2	1	0.2050	3.87120	-	1.472460
60	7/10/2011	7/10/2011	2	1	0.2084	3.87120	-	1.453452
61	12/10/2011	12/10/2011	2	1	0.2119	3.87120	-	1.434717
62	25/11/2011	25/11/2011	2	1	0.2154	3.87120	-	1.416245
63	1/12/2011	2/12/2011	2	2	0.2189	3.87120	-	1.398029

Anexo J. Base de datos para el ejemplo 2

No dato	Fecha Falla	TBF (horas) ti	TTR (horas) Tiempo entre reparación	Rm	xi = Ln(ti)	yi = Ln(-Ln(1-Rm))	$R(t) = \exp[-\frac{t-t_0}{\eta}^\beta]$	xi^2	yi^2	xi*yi
							Confiabilidad			
1	22/6/1998	216	24	0.017	5.375	-4.047	0.988	28.894	16.376	-21.753
2	28/5/1997	432	24	0.042	6.068	-3.147	0.957	36.826	9.902	-19.096
3	12/12/1998	648	24	0.067	6.474	-2.671	0.912	41.911	7.135	-17.293
4	25/6/2003	672	24	0.092	6.510	-2.343	0.906	42.383	5.489	-15.253
5	11/5/1998	696	24	0.116	6.545	-2.090	0.900	42.842	4.368	-13.680
6	12/6/1998	720	24	0.141	6.579	-1.883	0.894	43.287	3.547	-12.391
7	12/3/1997	768	24	0.166	6.644	-1.707	0.881	44.140	2.915	-11.344
8	16/12/2000	1224	24	0.191	7.110	-1.554	0.744	50.550	2.414	-11.047
9	22/10/2005	1296	24	0.215	7.167	-1.417	0.720	51.366	2.007	-10.154
10	16/5/1999	1344	24	0.240	7.203	-1.293	0.704	51.889	1.671	-9.311
11	12/5/1997	1440	24	0.265	7.272	-1.179	0.672	52.888	1.389	-8.572
12	22/12/1997	1440	24	0.290	7.272	-1.073	0.672	52.888	1.152	-7.804
13	28/3/2006	1512	24	0.314	7.321	-0.974	0.647	53.600	0.950	-7.134

14	17/5/2005	1656	24	0.339	7.412	-0.881	0.599	54.940	0.777	-6.534
15	29/12/2005	1656	24	0.364	7.412	-0.793	0.599	54.940	0.629	-5.880
16	15/12/2004	1680	24	0.389	7.427	-0.709	0.590	55.154	0.503	-5.267
17	26/5/2003	1704	24	0.413	7.441	-0.629	0.582	55.365	0.395	-4.677
18	8/12/2003	1704	24	0.438	7.441	-0.551	0.582	55.365	0.303	-4.099
19	24/9/2004	1704	24	0.463	7.441	-0.476	0.582	55.365	0.226	-3.539
20	12/4/1998	1920	24	0.488	7.560	-0.402	0.511	57.155	0.162	-3.042
21	18/9/1999	1992	24	0.512	7.597	-0.331	0.487	57.713	0.110	-2.515
22	8/3/2005	2040	24	0.537	7.621	-0.261	0.472	58.075	0.068	-1.989
23	27/8/2005	2160	24	0.562	7.678	-0.192	0.435	58.950	0.037	-1.475
24	24/3/1999	2232	24	0.587	7.711	-0.124	0.413	59.454	0.015	-0.956
25	16/3/2004	2280	24	0.611	7.732	-0.056	0.399	59.783	0.003	-0.436
26	18/10/2000	2352	24	0.636	7.763	0.011	0.378	60.264	0.000	0.085
27	18/7/2000	2472	24	0.661	7.813	0.078	0.344	61.040	0.006	0.612
28	18/9/1999	2808	24	0.686	7.940	0.146	0.260	63.047	0.021	1.159
29	12/7/2004	2808	24	0.710	7.940	0.214	0.260	63.047	0.046	1.703
30	6/4/2000	2880	24	0.735	7.966	0.284	0.244	63.450	0.081	2.263
31	15/3/2002	2880	24	0.760	7.966	0.355	0.244	63.450	0.126	2.831
32	15/8/2002	2928	24	0.785	7.982	0.429	0.234	63.714	0.184	3.423
33	27/11/2003	2952	24	0.809	7.990	0.505	0.229	63.844	0.255	4.038
34	28/6/2001	3204	24	0.834	8.072	0.586	0.180	65.160	0.343	4.730
35	13/11/2000	3452	24	0.859	8.147	0.672	0.141	66.369	0.452	5.475
36	19/11/1998	3648	24	0.884	8.202	0.766	0.114	67.272	0.587	6.283
37	22/6/2006	3672	24	0.908	8.208	0.872	0.111	67.379	0.760	7.154
38	16/2/2002	3912	24	0.933	8.272	0.995	0.085	68.423	0.991	8.233
39	16/4/2003	3936	24	0.958	8.278	1.153	0.083	68.524	1.330	9.546
40	22/11/1997	4128	24	0.983	8.326	1.400	0.066	69.315	1.960	11.656
Sumatoria				960.000	298.878	-22.316		2250.017	69.687	-136.046