



UNIVERSIDAD DE MATANZAS  
Facultad de Ciencias Técnicas

Programa de Doctorado en  
Tecnologías y Procesos Industriales

# EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LA TURBINA DE VAPOR POR EL MÉTODO ESFUERZO Y RESISTENCIA

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL GRADO CIENTIFICO  
DE DOCTOR EN CIENCIAS TÉCNICAS

Autor: M. Sc. Román Antonio Pérez Castañeda

Matanzas, 2024



UNIVERSIDAD DE MATANZAS  
Facultad de Ciencias Técnicas

Programa de Doctorado en  
Tecnologías y Procesos Industriales

# EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LA TURBINA DE VAPOR POR EL MÉTODO ESFUERZO Y RESISTENCIA

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL GRADO CIENTIFICO  
DE DOCTOR EN CIENCIAS TÉCNICAS

Autor: M. Sc. Román Antonio Pérez Castañeda

Tutores: Dr. C. Osvaldo Fidel García Morales  
Dr. C. Yanán Camaraza Medina

Matanzas, 2024

# DEDICATORIA

A mi familia:

- A mi madre, quien consideró que nunca es tarde para aprender y graduarse.
- A mi esposa Karina, quien siempre estuvo presente, motivando la continuación de la investigación.
- A mis hijos, para marcar el camino hacia el futuro

# AGRADECIMIENTOS

A Fidel, por la obra de toda su vida y por el discurso del 7 de julio de 1981, que nos dio el impulso final

A la Revolución, a los compañeros del Departamento de Mecánica y del CEFAS de la Universidad de Matanzas, especialmente a mis tutores, Dr. C. Osvaldo Fidel García Morales, Dr. C. Yanán Camaraza Medina, así como al Dr. C. Roberto Vizcón Toledo.

# DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL

Yo, Román Antonio Pérez Castañeda, declaro que soy el único autor de la siguiente tesis, titulada *“Evaluación de la confiabilidad de la Turbina de vapor por el método de Esfuerzos y Resistencia”* y, en virtud de tal, cedo el derecho de copia de la misma a la Universidad de Matanzas, bajo la licencia *Creative Commons* de tipo *Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada*, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación de ella.

Matanzas, 13 de noviembre de 2023.

Román Antonio Pérez Castañeda

# RESUMEN

La presente investigación propone la gestión del mantenimiento centrado en confiabilidad, basado en el método “carga-resistencia”, que permite tomar el riesgo como medida de urgencia de las reparaciones, particularizándolo en las plantas de generación con turbinas de vapor. Se proporciona una descripción general de los componentes de la turbina de vapor y sus mecanismos de fallo más comunes. Se propone considerar los componentes de la turbina de vapor, como la combinación de elementos idénticos, que fallan por uno y sólo un mecanismo, lo que permite evaluar la probabilidad de fallo, a través de métodos estadísticos basados en sistemas series o paralelos. Partiendo de la física del fallo, y las expresiones ampliamente utilizadas para su estudio, se encuentran expresiones que relacionan propiedades de resistencia con parámetros de esfuerzos aplicados (carga). Las bases de datos de la operación permiten determinar las distribuciones de probabilidad de parámetros, que caracterizan la carga, mientras que el estudio de las propiedades de los materiales permite la determinación de la resistencia. Posteriormente se evalúa la probabilidad de fallo comparando estas distribuciones de carga y resistencia. Se desarrollan expresiones para la probabilidad de fallo por erosión por partículas sólidas y para choque térmico, que constituyen novedad científica, pues no se ha encontrado en la literatura algo similar y se han recibido numerosos comentarios positivos, referentes a las publicaciones hechas por el autor. Además, se evalúa la confiabilidad como el opuesto de probabilidad de fallo para 7 mecanismos de degradación: erosión por partículas sólidas, erosión por gotas de agua, choque térmico, fatiga térmica, fluencia, corrosión bajo tensión y elevadas vibraciones. Se destacan los pasos a seguir para la aplicación de la metodología, con la que se logra determinar las acciones y el momento adecuado para ejecutar las intervenciones y evitar averías. El método propuesto es de elevada utilidad práctica, pues se puede utilizar en cualquier industria, incluso en la gestión del SEN, ya que cada unidad generadora se puede considerar un elemento del sistema y aplicar los conceptos de confiabilidad, que permiten una mejor programación de las intervenciones, priorizando aquellas unidades, con mayor probabilidad de fallo, es decir menor confiabilidad.

**Palabras claves:** Fallo, confiabilidad, gestión, RCM, mantenimiento, carga y resistencia.

# ABSTRACT

This research proposes reliability-centred maintenance management, based on the 'load-resistance' method, which allows taking risk as a measure of repair urgency, with a particular focus on steam turbine power plants. An overview of steam turbine components and their most common failure mechanisms is provided. It is proposed to consider the steam turbine components as a combination of identical elements, which fail by one and only one mechanism, allowing the probability of failure to be evaluated by means of statistical methods based on series or parallel systems. Based on the physics of failure, and the expressions widely used for its study, expressions are found that relate strength properties to applied stress (load) parameters. The operation databases allow the determination of the probability distributions of parameters, which characterise the load, while the study of the properties of the materials allows the determination of the resistance. Subsequently, the probability of failure is evaluated by comparing these load and strength distributions. Expressions are developed for the probability of failure due to erosion by solid particles and for thermal shock, which constitute a scientific novelty, since nothing similar has been found in the literature and numerous positive comments have been received, referring to the publications made by the author. In addition, reliability is evaluated as the opposite of failure probability for 7 degradation mechanisms: solid particle erosion, water droplet erosion, thermal shock, thermal fatigue, creep, stress corrosion and high vibration. The steps to follow for the application of the methodology are highlighted, with which it is possible to determine the actions and the right time to carry out the interventions and avoid failures. The proposed method is of great practical utility, as it can be used in any industry, even in the management of the SEN, as each generating unit can be considered an element of the system and reliability concepts can be applied, allowing better programming of interventions, prioritising those units with a higher probability of failure, i.e. lower reliability.

**Keywords:** Failure, reliability, management, RCM, maintenance, load and resistance.

# SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

HT	Transferencia de calor
AISI	American Iron and Steel Institute
RCM	Reliability Centered Maintenance
MPP	Mantenimiento Preventivo Planificado
LCC	Life Cycle Cost
SEN	Sistema Electroenergético Nacional
PCC	Partido Comunista de Cuba
OEM	Original Equipment Manufacturer
MTTR	Mean Time To Repair
MTBF	Mean Time Between Failure
PGR	Proceso generalizado de restauración
WTM	wind turbine condition monitoring
MPO	máxima probabilidad de ocurrencia
SPE	solid particle erosion (erosión por partículas sólidas)
$\alpha$	parámetro de escala
$\beta$	parámetro de forma
$\eta$	parámetro de efectividad de la reparación
$\lambda(t)$	número de fallo en el tiempo dado
$e$	número de Euler $e = 2.718281.....$
$t$	parámetro de interés o valor en $x$ (tiempo)
$t_0$	valor inicial en $x$ (tercer parámetro de Weibull)
$\eta$	vida característica
$\lambda$	conductividad térmica, en $W/(m \cdot K)$
$q$	flujo de calor por unidad de superficie, en $W/m^2$
$A$	área, en $m^2$
$\Delta T$	variación de temperatura.
$C_p$	calor específico, en $J/(kg \cdot K)$
$Q$	transferencia de energía en forma de calor, en $W$
$t$	<i>tiempo</i>



$t_f$	tiempo para el fallo
$m$	masa, en $kg$ .
$\rho$	densidad en $kg/m^3$ .
$V$	volumen en $m^3$ .
$\alpha$	difusividad en $mm^2/s$ .
$E$	energía en $J$
RMS	(root mean quart) raíz del error cuadrático medio
$N$	cantidad de puntos del conjunto.
$X'$	valor normalizado
$X$	valor real
$X_{min}$	valor mínimo de la variable $X$
$X_{max}$	valor máximo de la variable $X$
$N(\bar{X}, S)$	función de la distribución normal de probabilidades
$\bar{X}_{(T)}$	valor promedio de la variable $X$
$S$	desviación estándar
$\sum X_{(T)}$	sumatoria de los valores de $X$
$y_1$	humedad del vapor
$U_p$	velocidad circunferencial de los álabes
$\pi$	letra griega Pi, igual a 3.14159....
rpm	revoluciones por minuto
$R(t)$	Confiabilidad

# TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	1
Capítulo 1 La confiabilidad como elemento de la gestión empresarial .....	7
1.1 Generalidades sobre las estrategias de mantenimiento. ....	7
1.2 Evolución de la gestión del Mantenimiento .....	10
1.3 Definición de Confiabilidad.....	16
1.3.1 Confiabilidad operacional y fallo funcional .....	17
1.4 Métodos de evaluación de la confiabilidad de equipos .....	21
1.4.1 Metodología de Weibull para el cálculo de la confiabilidad .....	21
1.4.2 Predicción de la confiabilidad basada en el historial de fallos .....	22
1.4.3 Aplicación de estadísticos como indicadores de confiabilidad .....	23
1.4.4 Cálculo de confiabilidad en base a datos del monitoreo de la condición .....	25
1.4.5 Análisis “carga-resistencia” para estimar la confiabilidad .....	28
1.5 Conclusiones parciales del capítulo.....	38
Capítulo 2 Implementación de la metodología para el método “carga-resistencia” .....	40
2.1 Análisis de la turbina de vapor, sus componentes, funciones y mecanismos de fallo .....	42
2.1.1 Condiciones de trabajo del metal, que limitan su vida útil.....	45
2.2 Evaluación de la probabilidad de fallo de la turbina de vapor.....	46
2.2.1 Estudio de la física del fallo por erosión por partículas sólidas .....	48
2.2.2 Estudio de la física del fallo por erosión por gotas de agua .....	53
2.2.3 Estudio de la física del fallo por choque térmico. ....	55
2.2.4 Estudio de la física del fallo por agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC)..	58
2.2.5 Estudio de la física del fallo por creep .....	61
2.2.6 Estudio de la física del fallo por fatiga térmica .....	65
2.2.7 Evaluación de probabilidad de fallo por vibraciones .....	68
2.2.8 Influencia de la calidad del mantenimiento en la resistencia .....	71
2.3 Evaluación de la Confiabilidad total .....	73
2.4 Valoración del coeficiente de confiabilidad .....	74
2.5 Conclusiones parciales .....	75
Capítulo 3 Evaluación de la confiabilidad.....	77
3.1 Validación del modelo .....	77

3.2 Análisis de los resultados.....	78
3.2.1 Evaluación de la probabilidad de fallo de los álabes de la turbina, debido a erosión por partículas sólidas.....	78
3.2.2 Evaluación de la probabilidad de fallo por erosión por gotas de agua.....	80
3.2.3 Evaluación de la probabilidad de fallo por choque térmico.....	84
3.2.4 Evaluación de la probabilidad de fallo por agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC).....	86
3.2.5 Evaluación de la probabilidad de daño por creep.....	89
3.2.6 Evaluación de probabilidad de daños por fatiga térmica.....	91
3.2.7 Evaluación de probabilidad de fallo por vibraciones mecánicas.....	93
3.2.8 Evaluación de la Confiabilidad total.....	94
3.2.9 Aplicación de los criterios de aceptación de la Confiabilidad.....	94
3.3 Conclusiones parciales.....	95
Conclusiones.....	97
Recomendaciones.....	99
Referencias Bibliográficas.....	100
Anexos.....	109
Anexo 1. Principales datos sobre las propiedades del metal de los componentes de la turbina y base de datos de operación.....	109
Propiedades del material del rotor y parámetros de operación.....	109
Anexo 2. Metodología de Weibull para determinar la Confiabilidad.....	112
Anexo 3. Análisis multivariante.....	112
Anexo 4. Cálculo de confiabilidad de sistemas (Estructuras básicas).....	114
Anexo 5. Monitoreo de la condición en planta de generación de electricidad.....	117
Anexo 6. Cálculo de coeficientes para fatiga térmica.....	121

# INTRODUCCIÓN

Las empresas generadoras de bienes y/o servicios que utilizan instalaciones, edificios, máquinas, equipos, herramientas, utensilios y dispositivos, para lograr su objetivo social necesitan que sus activos se mantengan en un estado de funcionamiento adecuado a las necesidades, al procurar que la vida útil sea la máxima posible al mínimo costo, lo que se logra a través del mantenimiento, como complemento a la producción. (Nachlas J., 1995.). Para lograr este objetivo es común encontrar industrias que adoptan medidas reactivas, orientadas a restaurar equipos dañados, abandonando las medidas proactivas, basadas en el diagnóstico del estado y dirigidas a la prevención de los fallos, como actividades prioritarias dentro de una adecuada estrategia empresarial. (Keith M, 2008) (Durán J.B, 2018)

Las empresas que aplican medidas proactivas buscan la solución al conflicto de intereses entre la operación y el mantenimiento en el conocimiento de las leyes que gobiernan esta relación. Para el estudio y conocimiento de dichas leyes se utilizan los conceptos de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad. (Toro J.C., 2010). Este análisis es particularmente útil para decidir en los escenarios de las empresas de producción continua, tal como la industria de generación de electricidad. (Durán J.B, 2018). La presente investigación está dirigida solamente al estudio de la confiabilidad, sin obviar que la disponibilidad tiene cierta prioridad en la gestión empresarial, ni tampoco la dependencia que tiene la confiabilidad de la mantenibilidad.

Grandes corporaciones del sector de hidrocarburos y de la industria de procesos, han volcado su atención hacia el modelo de decisión “costo- riesgo”, ya que el mismo permite comparar el costo asociado a las acciones de mantenimiento contra el nivel de reducción del riesgo o mejora del desempeño de la producción, debido a esas acciones, entendiendo que el riesgo depende de la probabilidad de fallo y sus consecuencias (Yañez M, 2003) (Cabrera J y de la Torre F, 2018). El riesgo permite comparar activos con elevada frecuencia de fallos y bajas consecuencias (una bomba de enfriamiento) con otros que por el contrario se caracterizan por tener baja frecuencia de fallos con elevadas consecuencias (turbina de vapor). (Modarres M, 1999)

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) es una metodología que, desarrolla estrategias, basadas en el principio básico del entendimiento de las funciones que cumple el activo, y sus modos de fallo, para determinar los requerimientos del mantenimiento en su contexto operacional, proponiendo tareas, que son factibles desde el punto

de vista técnico y económico. Esta estrategia tiene como antecedente el empleo del cálculo de la confiabilidad en la esfera de la cosmonáutica, y posteriormente fue adoptada por la generación de electricidad con plantas nucleares, donde las consecuencias de los fallos son catastróficas (Martínez E., 2018).

Adicionalmente, se destaca a la ingeniería de confiabilidad como el marco teórico-conceptual en el que conviven las metodologías y técnicas para lograr este fin. “Ingeniería de confiabilidad; porque una de las mejores formas para agregar valor; es evitar que se destruya”. (Mora, A., 2006) (Toro J.C., 2010), (Evtech, 2019)

La ingeniería de la confiabilidad es el estudio de la longevidad y del fallo de los activos. Para la investigación de las causas por las que los dispositivos envejecen y fallan se aplican principios científicos y matemáticos (Bazovsky I, 2020). El objetivo estriba en que una mayor comprensión de los fallos de los dispositivos ayudará en la identificación de las mejoras que pueden introducirse en los diseños de los productos para aumentar su vida o por lo menos para limitar las consecuencias adversas de los fallos. Por tanto, se concede mucha importancia al diseño de los productos o a su rediseño, con anterioridad a la fabricación o a la venta. (Martínez E., 2018). En este sentido el análisis tradicional de la confiabilidad se ha basado en la estadística del tiempo entre fallos, y ha sido utilizado para mejorar el mantenimiento preventivo planificado (MPP), y elevar el desempeño de los activos a niveles superiores de competitividad. Se considera el fallo como la incapacidad del activo o sistema de realizar la misión, que tiene encomendada por diseño, teniendo en cuenta la función que cumple el sistema a que pertenecen en el ciclo productivo. (Nachlas J., 1995)

Según Durán las metodologías y filosofías de una buena gestión empresarial deben contemplar la estrecha relación del mantenimiento con la operación, por lo que debe abarcar las acciones para garantizar la mejora tanto en la operación como el mantenimiento, lo que no se ha logrado hasta ahora, por no contar con indicadores que evalúen ambas disciplinas al mismo tiempo. (Durán J, 2018)

Las limitaciones de la aplicación del cálculo en base a los datos de los fallos imponen un nuevo reto, consistente en encontrar una forma de evaluar la confiabilidad, de tal manera que la probabilidad de un nuevo fallo, se determine teniendo en cuenta el estado real de los activos, y no solamente los datos históricos de fallos, para que pueda ser empleada permanentemente en la

evaluación de la necesidad de ejecutar mantenimientos y reparaciones, así como para modificar los parámetros de operación. (Lyonnet P., 1991), (Yañez M, 2003)

Para la implementación de estrategias proactivas se emplean las técnicas predictivas, basadas en el monitoreo de los parámetros, de forma que permanentemente se caracterice el estado del activo, y por tanto se calcule la probabilidad de fallo (Romero A, 2018). Las técnicas predictivas han alcanzado un alto nivel de desarrollo, y se han introducido los avances de la ciencia y la tecnología, lo cual permitió disminuir, de forma considerable, los costos de los instrumentos destinados al monitoreo de diferentes parámetros síntomas, como son las vibraciones, la temperatura, la condición del aceite, entre otros, y a su vez se ha favorecido el aumento de forma exponencial de la aplicación de estas técnicas en las distintas industrias (Wang Z, 2021). El desarrollo de estas técnicas ha permitido la implantación de sistemas de monitoreo off-line para equipos auxiliares y el montaje de sistemas de monitoreo on-line y en tiempo real para equipos principales, y permiten conocer los cambios en la condición de estos activos tan pronto como se producen, lo que constituye una inigualable herramienta para determinar el momento óptimo de realizar las diferentes intervenciones o cambios en los parámetros de operación, a través de lo que se conoce como mantenimiento predictivo o basado en la condición. (Wang Z, 2021) (Yanghui T, 2020)

La gestión de la confiabilidad según los métodos más utilizados en la actualidad, como son el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) y la metodología de Weibull, se basan en las estadísticas de los fallos, lo cual deja a un lado la información que brinda el monitoreo de la condición y el diagnóstico de equipos y sistemas. Además, el RCM siendo un soporte para la gestión de la confiabilidad no ofrece un indicador que permita valorar la urgencia de las reparaciones, ni permite dar recomendaciones a la operación, para minimizar el riesgo de fallo. (Cabrera J., 2003.), (San Martín, C. 2018).

Situación problemática:

En las nuevas directrices económicas del país, dictadas por el PCC se establecen objetivos encaminados a elevar la eficacia y eficiencia de los mantenimientos y la operación, lo que equivale a decir que se hace necesario encontrar nuevos métodos de gestión empresarial, que minimicen los costos y eleven la calidad de los mantenimientos, de forma que se garantice el cumplimiento de los indicadores técnico-económicos con ahorro de los recursos materiales y financieros (PCC, 2017). El Ministerio de Industria ha puesto en vigor las Resoluciones 66 y 67, sobre la gestión del Mantenimiento Industrial, que indica cómo se debe realizar el proceso de mantener las unidades

generadoras (MINDUS, 2021). El empleo de estrategias proactivas, basadas en modernas formas de gestión con fundamentos en métodos científicos y apoyados en la ciencia, ofrecen un camino seguro para llevar la industria de generación de electricidad a los niveles esperados de satisfacción de las crecientes necesidades.

En la Termoeléctrica “Antonio Guiteras Holmes” de Matanzas, como parte integrante de las empresas generadoras del Sistema Electroenergético Nacional (SEN), los planes técnico-económicos de operación y mantenimiento se establecen partiendo de la necesidad de disponibilidad de energía para un año y la prioridad de restablecer el estado técnico de los agregados y componentes, que ya presentan signos de malfuncionamiento (mantenimiento correctivo). Este modo de determinar el plazo, el alcance, la calidad y los costos de los mantenimientos no evalúa la confiabilidad de la operación, es decir la probabilidad de que los componentes fallen en el periodo de tiempo analizado, como tampoco tiene en cuenta, el aumento de los costos de operación y mantenimiento, por causa del deterioro de los indicadores de eficiencia (previstos en el plan técnico económico), debido al mal funcionamiento de determinados equipos, lo que no garantiza una buena gestión empresarial. Por tal razón es frecuente que las unidades generadoras presenten averías y salidas de servicio no planificadas, para las cuales no se han determinado los recursos, necesarios para restablecer el estado técnico, lo que conduce largos periodos de mantenimiento y bajas disponibilidades. Para el caso particular de la turbina de vapor, se establecen 5 años como periodos entre mantenimientos capitales, pero se alargan estos plazos porque no se cuenta con la capacidad de generación, que se demanda nacionalmente. Ante esta situación, no se cuenta con un indicador, que sirva como criterio para determinar el momento de las paradas. La implementación de estrategias de gestión, basadas en el conocimiento del estado técnico de los equipos y la planificación correcta de los mantenimientos y de la operación, sobre la base de los conceptos de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad permiten determinar en qué momento se deben realizar las intervenciones con un alcance óptimo. La disminución de la probabilidad del fallo se puede alcanzar tanto con acciones de mantenimiento como a través de la correcta operación, es decir, manteniendo los parámetros de operación en rangos que, no propicien grandes esfuerzos para los componentes de los equipos tecnológicos. Las actuales metodologías de evaluación de la confiabilidad no permiten conocer la influencia de la operación en la probabilidad del fallo, por eso en el marco de la actual investigación se ha decidido perfeccionar la gestión basada en la confiabilidad de la turbina de vapor, y una vez implementada la metodología para este equipo, generalizarla para el resto de los activos de la industria.

Problema científico de investigación:

Cómo evaluar la confiabilidad de la turbina de vapor en funcionamiento, de forma que indique cómo disminuir la probabilidad de fallo, cambiando los parámetros de proceso y además implementar la gestión de su mantenimiento sobre esta base, teniendo en cuenta los datos históricos de la operación y utilizando la información brindada por el sistema de monitoreo de la condición, que soporte la toma de decisiones para resolver el conflicto de intereses entre la operación y el mantenimiento en la central termoeléctrica, es decir que determine cuándo el riesgo de fallo indica que no se debe continuar operando la unidad.

**Hipótesis:** Partiendo de los conceptos tradicionales para calcular la confiabilidad y analizando la física de los fallos, se pueden encontrar expresiones que relacionan los esfuerzos a que están sometidos los componentes, con sus propiedades de resistencia. Si se encuentra una combinación adecuada de los parámetros de proceso para caracterizar los esfuerzos (carga), entonces la probabilidad de fallo es la probabilidad de que dichos parámetros excedan los “límites de resistencia” de cada componente de la turbina en las condiciones de operación que se les impone, considerando que, tanto los valores de los parámetros de procesos como las propiedades mecánicas de los materiales, presentan distribuciones normales de probabilidad.

**OBJETIVO GENERAL:**

Desarrollar una metodología para la evaluación de la confiabilidad de la turbina de vapor en funcionamiento, basada en los parámetros registrados de la operación y el monitoreo para diagnóstico, que sustente la gestión de la operación y el mantenimiento de este activo.

**OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

1. Realizar un estudio detallado de la evolución del mantenimiento aplicado a turbinas de vapor, para conocer la tendencia actual. Estudiar los métodos de evaluación de la confiabilidad para determinar el que ofrece mejores oportunidades para cumplir los objetivos.
2. Estudiar la turbina de vapor: funciones, condiciones de operación normal, principales componentes y sus mecanismos de degradación que conducen al fallo. Estudiar la física de los fallos y determinar expresiones que relacionen los parámetros de operación, es decir,



los esfuerzos a que se someten los componentes con sus propiedades mecánicas de resistencia.

3. Evaluar las expresiones encontradas empleando los datos registrados durante la operación y el diagnóstico. Aplicación práctica del método.

La novedad científica de la investigación radica en el desarrollo y aplicación de la metodología para evaluar la confiabilidad por el método “carga- resistencia”, ya que en la literatura estudiada se ha mencionado la posibilidad de su aplicación, pero no se muestran ejemplos prácticos de su aplicación, ni tampoco se dan evidencias de cómo se hace. La novedad de la metodología incluye:

- Considerar los componentes de la turbina de vapor, como la combinación de elementos conectados entre sí, cada uno de los cuales puede fallar por uno y sólo un mecanismo, entonces la confiabilidad se evalúa teniendo en cuenta sistemas serie, paralelo o combinado.
- A partir de investigaciones anteriores, encontrar expresiones de la física del fallo, que relacione las propiedades mecánicas (resistencia), con los parámetros de operación, que condicionan la carga a que está sometido el elemento. Particularmente se destacan las expresiones para la resistencia al fallo por erosión por partículas sólidas y para el choque térmico, en los álabes de las turbinas de vapor, que han sido publicadas recibiendo numerosas críticas positivas por prestigiosas instituciones del mundo.

# CAPÍTULO 1 LA CONFIABILIDAD COMO ELEMENTO DE LA GESTIÓN EMPRESARIAL

Este Capítulo tiene el objetivo de presentar el resultado de la revisión bibliográfica sobre los temas relacionados con la investigación. Se presenta la evolución histórica con tendencia hacia el empleo de la confiabilidad en la gestión empresarial y se demuestra el potencial de estos métodos para garantizar una elevada disponibilidad. Se valora cómo los diferentes autores proponen la aplicación del mantenimiento basado en la confiabilidad, aplicado en las diferentes industrias y los resultados obtenidos, y en qué grado estos resultados satisfacen los objetivos trazados en la presente investigación. El Capítulo brinda los fundamentos teóricos, en los que está basada la metodología, presentada en el Capítulo II, sobre el método carga vs resistencia.

## 1.1 Generalidades sobre las estrategias de mantenimiento.

En la actualidad el tema de la gestión del mantenimiento de las turbinas de vapor ha cobrado gran interés, debido a que con el aumento de la capacidad de las unidades generadoras y de los parámetros del vapor a base de combustible fósil, de conjunto con la elevación de las exigencias en cuanto a su confiabilidad, disponibilidad, eficiencia y cuidado del medio ambiente, se necesita contar con sistemas de control y monitoreo más sofisticados, para asegurar una calidad apropiada de la operación, con un mínimo de desviación de los parámetros de diseño. (Leyzerovich A. 2008) (Nicholas J. 2019).

La búsqueda de métodos, que permitan una mejor gestión empresarial, es una de las tareas de mayor prioridad en el contexto actual, en que se desarrolla la industria de generación de electricidad en Cuba. La generación no satisface la demanda, y se hace referencia a que el mantenimiento es el responsable de esta situación. ¿Es realmente el mantenimiento el único responsable? ¿Es la violación del ciclo de mantenimiento la causa raíz? (Notas del autor). Un aspecto de mucha importancia es la determinación del intervalo entre las intervenciones y la duración de cada una de ellas; sin embargo, se ha demostrado, que este plazo es uno de los componentes del sistema de objetivos de la gestión del mantenimiento, y no una variable totalmente independiente; lo cual significa que, para determinar el plazo, es necesario y obligatorio tener en cuenta además el costo, la calidad y el alcance de la intervención.

Las empresas que han evidenciado los mayores avances, basan su competitividad empresarial en el conocimiento, control y desarrollo del sistema de objetivos para la gestión de los proyectos de

mantenimiento. (Mckinsey & Company, 1994). Mundialmente las empresas que adoptan medidas proactivas buscan la solución a la problemática en el conocimiento de las leyes que gobiernan la relación entre operación y mantenimiento (Mora A. 2006). Para el estudio y conocimiento de dichas leyes se utilizan los conceptos de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad. (Toro J.C. 2010). Gestionando adecuadamente el sistema de objetivos, se podrá optimizar la disponibilidad de los bienes y servicios, que garantizarán una elevada competitividad y satisfacción de la demanda.

En el caso específico de las unidades generadoras de electricidad se desea obtener una disponibilidad adecuada, sin embargo, ni en América del Norte ni en Europa existen regulaciones para determinar intervalos específicos entre los mantenimientos de las turbinas de vapor no nucleares, independientemente de la industria o de la aplicación. En Japón, sin embargo, hay requisitos reglamentarios para el mantenimiento periódico. Independientemente de la zona del mundo, los requisitos del mantenimiento programado, recomendados para turbinas de vapor son bastante similares. Para establecer intervalos de tiempo más largos entre las principales paradas de reacondicionamiento general, existen diferentes enfoques, que se utilizan hoy en día en todo el mundo (Bazovsky I, 2020) (García S. 2008).

Es importante que las metodologías establezcan eficazmente los intervalos de reacondicionamiento general, sobre la base de las partes de mayor riesgo de la turbina de vapor. La revisión bibliográfica revela, que el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) es el que ha aportado los mejores resultados en las diferentes industrias. No obstante, este tipo de mantenimiento presenta serias limitaciones, que impiden su aplicación ampliada, tal como se esperaba en el momento de su surgimiento. El análisis tradicional de la confiabilidad se ha basado en la estadística del tiempo entre fallos, y ha sido utilizado para optimizar el mantenimiento preventivo (MPP), al elevar el desempeño de los activos a niveles superiores de competitividad. Por otra parte, la confiabilidad, calculada en base a las estadísticas de fallos en el tiempo, ha sido utilizada preferentemente por los fabricantes para perfeccionar los diseños, acorde a las necesidades y exigencias de los clientes. (Nachlas J, 1995). En las empresas de producción continua, como lo es la industria eléctrica, se ha comenzado a emplear la confiabilidad, como indicador para la gestión del negocio (Durán J.B, 2018). Por otro lado, la seguridad y la confiabilidad de cualquier instalación industrial, dependen fuertemente del comportamiento de los sistemas y sus componentes, los que pueden ser operados a elevados niveles, asistidos por una

adecuada gestión del mantenimiento. El monitoreo inteligente de la condición puede ser la llave para implantar una gestión adecuada del mantenimiento (Wang Z, 2021). No es fácil de alcanzar este propósito, cuando no existen suficientes datos sobre los principales fallos, que deben ser detectados. (Yanghui T., 2020)

Los equipos reparables, que se encuentran en explotación deben ser operados con el máximo de confiabilidad, para garantizar una elevada disponibilidad y satisfacción de las demandas de bienes y servicios, lo cual no sólo depende del diseño, sino también del mantenimiento y de la operación, así como del factor humano en cada etapa del ciclo de vida. (Kritsov V, 2000) (Lifetime Reliability, 2021)

Para la toma de decisiones sobre cuándo (plazo) y qué acciones de mantenimiento (alcance) se debe tomar para disminuir el riesgo de la ocurrencia de un fallo o una avería, las metodologías, que se aplican actualmente se han visto limitadas fundamentalmente porque:

- Las actuales metodologías pueden determinar qué hacer, sin definir cuándo hacerlo, o dar una recomendación de la urgencia de las acciones de mantenimiento y reparación, pero sin definir qué hacer.
- Estas metodologías se basan en la supuesta dependencia que tiene la tasa de fallo de la edad del activo (ciclo de vida). Moubray ha demostrado que menos del 11% de los fallos tienen relación con la edad.
- Las metodologías basadas en la historia de los fallos no estimulan la aplicación de modernas técnicas de monitoreo y diagnóstico, y mucho menos el llamado mantenimiento 4.0.
- Se necesita contar con una estadística muy buena de los fallos y los tiempos de su ocurrencia y reparación, cuestiones que no siempre están disponibles. Es decir que, para evitar la ocurrencia de fallos, se necesita una gran cantidad de fallos.
- Los resultados obtenidos con estas metodologías pierden validez si cambia el entorno de la operación de los activos, ya que ellas tienen como premisa que las condiciones de operación y funcionamiento sean razonablemente uniformes. Por lo que se aplican con mayor éxito a “equipos no reparables”.

- Los fallos ocurridos y ya reparados pueden influir o no en el desempeño posterior de las instalaciones, por lo que la estadística puede que no refleje la probabilidad de fallo en las nuevas condiciones operacionales, después de la reparación. Dicho de otra forma, cuando el mantenimiento elimina las causas de los fallos, cambia completamente la probabilidad de la ocurrencia de un nuevo fallo. Por tal razón, estos resultados son utilizados preferiblemente para mejorar los diseños.

Estas limitaciones de la aplicación del cálculo de la confiabilidad en base a los datos históricos de los fallos, imponen un reto para las empresas de producción continua, que consiste en encontrar una metodología de evaluación, para que la probabilidad de un nuevo fallo se determine teniendo en cuenta el estado real de los activos, y no el histórico de fallos, y que pueda ser empleada permanentemente en la evaluación de la urgencia de los mantenimientos o reparaciones y para determinar cuáles son las tareas, que se deben ejecutar, es decir, que permita gestionar el sistema de objetivos del mantenimiento para los equipos durante la etapa de operación y mantenimiento (plazo, costo, calidad y alcance).

Con en el empleo de las técnicas predictivas, relacionadas con el monitoreo de parámetros síntomas de malfuncionamiento se puede caracterizar el estado del activo, y por tanto evaluar la probabilidad de fallo, y se determinan los elementos de las máquinas con más probabilidad de fallar, así como las acciones de mantenimiento y reparación que deben ser ejecutadas para minimizar el riesgo de fallo.

## 1.2 Evolución de la gestión del Mantenimiento

El análisis tradicional de la confiabilidad para la gestión de los objetivos del mantenimiento, ha estado basado en la estadística del tiempo entre fallos, y ha sido utilizado para mejorar el mantenimiento preventivo planificado (MPP), pero sobre todo para optimizar los diseños y fabricar equipos más confiables. Sin embargo, la necesidad imperiosa de la mejora continua y elevada competitividad de las industrias en la etapa de operación, ha condicionado la realización de grandes esfuerzos en la recolección de datos diferentes a la estadística de fallos, a través de programas de monitoreo de la condición, con la finalidad de elevar la disponibilidad de los activos para satisfacer las necesidades de los clientes, y además optimizar los costos de la operación y de los mantenimientos, lo que se logra con la implantación de filosofías de mantenimiento como son el mantenimiento predictivo y el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM). (Yanghui T, 2020)

Al considerar las causas de los fallos, se debe tener en cuenta, que ellos se hacen evidentes en 3 momentos: durante el montaje y puesta en marcha (mortalidad infantil), durante la operación y mantenimiento (fallos aleatorios) y fallos relacionados con el envejecimiento (desgaste). Se describen 6 patrones de ciclos de vida (Figura 1.1) (Martínez E., 2018). Los primeros tres patrones corresponden a elementos simples o equipos, que están en contacto directo con el producto. Estos patrones se asocian con fallos por fatiga, corrosión, evaporación y abrasión, están relacionados con cargas cíclicas, en las que existe una zona de desgaste al cabo de cierto tiempo. Los últimos tres patrones corresponden a equipos complejos de electrónica, hidráulica y neumática. Estos patrones se asocian a fallos aleatorios, donde no se conoce un periodo de vida útil de los componentes. El fallo aleatorio puede ser súbito o progresivo. De ser súbito, no existe una manera de prevenirla y debe ser mitigada. En el caso de que sea aleatorio y progresivo, se pueden monitorear las condiciones de operación para determinar el periodo adecuado para tratar ese modo de fallo. (Knezevic J, 1987)

Según revela Moubray, estudios llevados a cabo en la aviación civil mostraron que el 4% de las piezas está de acuerdo con el modelo A, el 2% con el B, el 5% con el C, el 7% con el D, el 14% con el E y no menos del 68% con el modelo F. En general, los modelos de los fallos dependen de la complejidad de los elementos. (Moubray J, 2000) (Cabrera J, 2003)

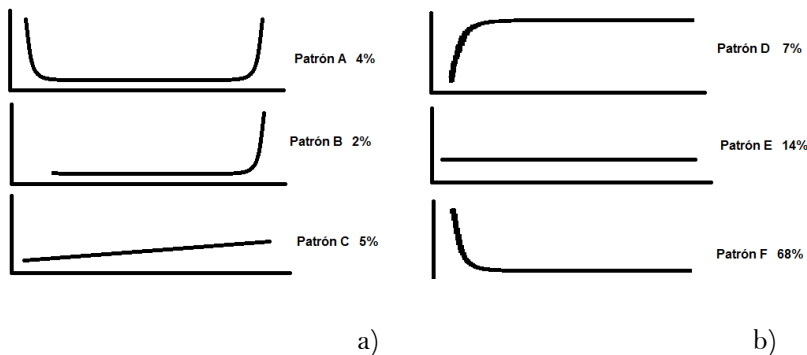


Figura 1.1. Patrones de ciclos de vida. a) Dependentes del tiempo; b) no dependientes del tiempo. (Martínez E., 2018) (Cabrera J, 2003)

Cuanto más complejos sean los equipos, es más probable que estén de acuerdo con los modelos E y F. Estos hallazgos contradicen la creencia de que siempre hay una conexión entre la confiabilidad y la edad operacional. Las investigaciones sobre los modos de fallos revelan, que la mayoría de los fallos de los sistemas complejos formados por componentes mecánicos, eléctricos e hidráulicos

fallarán en alguna forma fortuita y no son predecibles con algún grado de confianza. (Martínez E, 2018) (Poveda J., 2011) (Bangalore P., 2018) (Hansi C., 2021) (Hongshan Z., 2018) (Altmann C., 2008).

Para la optimización del mantenimiento se han desarrollado varios modelos matemáticos, que se pueden dividir en dos categorías generales, según el tipo de modelo estadístico de tasa de fallos:

- Modelos de optimización de mantenimiento preventivo basado en la edad.
- Mantenimiento basado en la condición.

Los programas resultantes de los modelos de optimización, basados en la edad estipulan reemplazos de componentes basados en modelos de tasa de fallos, derivados de históricos, mientras que los programas basados en la condición, utilizan los modelos de tasa de fallos, basados en información de los sistemas de monitoreo de condición.

Para optimizar el mantenimiento de los álabes de la turbina de un aerogenerador Romero formuló un modelo de optimización, para encontrar el número óptimo de daños observables en las palas, que deben permitirse antes de iniciar una actividad de mantenimiento preventivo o mantenimiento correctivo (Romero A., 2018). Se comparan diferentes estrategias de monitoreo de condición desde la perspectiva del Costo del Ciclo de Vida (LCC) y se sugirió una estrategia óptima para el monitoreo del álabe; el modelo utiliza la información del sistema de monitoreo de la condición.

Pero, aun así, la confiabilidad basada en la condición no ha alcanzado una amplia aplicación, principalmente por no contar con una metodología aceptada para definir el parámetro, que mejor represente la condición, ni la referencia con la cual compararlo.

A finales de la década de los 90 John Moubray introduce la filosofía del mantenimiento centrado en confiabilidad (RMC), la que tiene en cuenta todos los aspectos positivos de los anteriores tipos de mantenimientos, y a través de 7 preguntas, va guiando la acción para la planificación, de forma tal, que se priorice la confiabilidad de las funciones, por encima de la necesidad de reparaciones y mantenimientos de equipos específicos. (Moubray J., 2000)

El RCM se centra en la relación entre el sistema y los elementos físicos que lo componen. Antes de que se pueda explorar esta relación detalladamente, se necesita saber qué tipo de elementos físicos existentes en la empresa, y decidir cuáles son las que deben estar sujetas al proceso de

revisión del RCM. En la mayoría de los casos, esto significa que se debe realizar un registro de equipos completo. (Moubray J. 2000), (Cabrera J. 2003), (García S. 2008).

Según Latcovich la frecuencia de los mantenimientos se basaba, sobre todo, en el tiempo esperado de vida útil de los componentes más críticos (Latcovich et al, 2005). Los reacondicionamientos se programaban y realizaban independientemente de la condición real de estos componentes en el momento dado. Todos los fabricantes originales de equipos (OEM, por las siglas en inglés), sobre la base de la necesidad de optimizar la confiabilidad y la disponibilidad de la planta, y al mismo tiempo para reducir los costos de mantenimiento, desarrollaron sistemas de gestión de datos de plantas, que hacen hincapié en la recogida on-line (en línea) de datos de operación y de la condición. Todo esto se hace con el fin de apoyar a sus clientes con los problemas de funcionamiento diario y la programación del mantenimiento general, así como el asesoramiento y apoyo durante las paradas y la posterior puesta en marcha de las plantas. (Yanghui T, 2020), (Wang Z, 2021)

Al analizar la evolución histórica del mantenimiento Mora demuestra que las empresas líderes han alcanzado tal grado de conocimiento, experiencia, desarrollo de tecnologías propias y dominio de modernas técnicas de mantenimiento y producción, que empiezan estas dos áreas a trabajar en forma conjunta y alineada por encima de cualquier obstáculo propio, en aras de optimizar el bien común que las relaciona: la máquina (o aparato productivo), al dejar de mirarla como un pasivo, que hay que utilizar para producir y mantenerlo para que se pueda utilizar, y entenderlo como un activo que genera ingresos para la organización. (Mora L. A. 2008)

En síntesis, se mejora la disponibilidad, mediante la eliminación de fallos, o a través de la reducción de los tiempos de reparación y mantenimientos planeados, como también al eliminar o disminuir los tiempos logísticos requeridos para mantenimiento y/o producción. (Poveda J, 2011)

Aguilar y otros autores diseñaron un sistema inteligente para el manejo de los fallos, basado en confiabilidad, lógica difusa y redes neuronales, que les permite generar tareas de mantenimiento conociendo el comportamiento histórico y el estado actual de los equipos, aunque recomiendan aplicar la confiabilidad basada en la condición, sólo a equipos estáticos, para los que no se tienen suficientes datos estadísticos. Sin embargo, se utiliza el cálculo de la confiabilidad basado en los tiempos entre los fallos. (Aguilar et al, 2005)

Santana enfatiza que el aumento de la disponibilidad y la reducción de los costos de mantenimiento son los puntos básicos que deben ser alcanzados por los gerentes de mantenimiento; y utilizar las



herramientas de confiabilidad para su gestión, control y planificación. Expone la metodología del cálculo de la confiabilidad de sistemas completos, integrados por equipos particulares, que se pueden considerar trabajando en serie o paralelo, dependiendo de la función que realizan. Nuevamente, se ponen ejemplos de cálculo de confiabilidad, pero en base a la edad y la estadística de los fallos. (Santana E. 2004)

Grand en su tesis de maestría calcula la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad de una central termoeléctrica a partir de datos estadísticos de los fallos registrados. Sin embargo, no puede dar criterios acerca de la urgencia de las intervenciones, ni proponer un alcance para elevar la disponibilidad. (Grand A. y Adriana, A. 2001)

Medardo Yañez, junto a otros autores analiza el mantenimiento proactivo e integrado como el proceso de caracterización del estado real del equipamiento, que permite predecir su futuro, mediante el análisis del historial de los fallos, datos de la condición y datos técnicos, con la finalidad de identificar las acciones correctivas y proactivas que puedan optimizar los costos de la operación y el mantenimiento. La metodología propone para estos fines, el uso del riesgo, como la probabilidad de tener pérdidas por la ocurrencia de un fallo, donde la probabilidad de la ocurrencia del fallo se calcula según la metodología de Weibull. Además, para aquellos equipos, para los cuales no se tiene una estadística suficiente, propone el cálculo de la confiabilidad basada en la condición (relación “carga-resistencia”), pero sin abordar cómo se hace. No ofrece una forma práctica de aplicación del método. (Yañez M., 2003)

Teresita Rodríguez en su tesis de doctorado expone dos métodos para determinar el parámetro síntoma de diagnóstico de la limpieza del generador de vapor de la CTE Antonio Guiteras, uno es basado en la opinión de los expertos (método de Kendall) y otro referido a tomar el parámetro de diagnóstico, que requiera la menor complejidad tecnológica (método de Luna). (Rodríguez, T. 2005)

Joel Nachlas analiza el tipo de fallo mecánico y expone las expresiones matemáticas del cálculo de la probabilidad de fallo de componentes mecánicos, como la probabilidad de que la fuerza supere las tensiones, que se originan en los componentes, teniendo en cuenta, que tanto la fuerza como las tensiones tienen funciones de distribución del tipo normal. El autor intenta aplicar el método, pero termina calculando la confiabilidad sobre la base del tiempo de operación y determina ni los esfuerzos ni la resistencia. (Nachlas J., 1995)

Knezevic dedica un capítulo de su libro al mantenimiento basado en la condición, donde expone parte de su trabajo dedicado al cálculo de confiabilidad, en base a parámetros que miden la condición del activo, y demuestra, que tanto la medición de los valores de estos parámetros, como los límites admisibles, que pueden soportar los activos, tienen carácter aleatorio, y se pueden describir con ayuda de la función Normal de Laplace. De aquí la conclusión, de calcular la confiabilidad como la probabilidad de que un parámetro síntoma de fallo, sea superior a su valor límite, con la ayuda de esta función. (Knezevic J., 1996)

Francisco de la Torre en su tesis en opción al título de doctor en ciencias técnicas, presentó un modelo estadístico, basado en datos de proceso generados por el sistema de monitoreo on-line, implementado en las turbinas de vapor de 100 MW de Cuba, para evaluar el comportamiento mecánico dinámico funcional, tomando el valor del parámetro estadístico  $T^2$  de Hotellings, calculado a partir del empleo del análisis multivariable, como parámetro síntoma de la condición de dichas turbinas. Se proponen los elementos esenciales a tener en cuenta para el empleo del control multivariante del proceso, para determinar la condición. Durante la investigación se logró establecer el seguimiento del parámetro  $T^2$  de Hotellings y su comparación con el valor límite, encontrándose así los momentos en que se ve afectada la condición de la turbina (De la Torre, F. 2005). Un método similar, basado en estadísticos, fue propuesto por Wang. (Wang Z, 2021). Sin embargo, el método no es capaz de determinar el componente que está fallando, ni las causas, ni las tareas de reparación y mantenimiento necesarias, para devolver la confiabilidad del funcionamiento.

Keith Mobley expone los principales principios de la gestión del mantenimiento. Realiza un recorrido por las diferentes filosofías de la gestión del mantenimiento con sus ventajas y desventajas; analiza y expone las diferentes herramientas para el mantenimiento basado en confiabilidad, como son la aplicación de técnicas predictivas para fortalecer el mantenimiento proactivo. (Keith M. R. et al., 2010)

La tendencia de la evolución del mantenimiento ha sido hacia estrategias basadas en la confiabilidad, ya sea por métodos estadísticos o por la física de los fallos, porque se trata de evitar su ocurrencia, encontrando las causas de su desarrollo y el momento de mayor probabilidad de su aparición, teniendo en cuenta, que la solución no está en optimizar la operación solamente, ni tampoco en la gestión aislada del mantenimiento, sino en su interrelación.

### 1.3 Definición de Confiabilidad

La presente Investigación, siguiendo la tendencia, se dirige hacia filosofías de mantenimiento que, garanticen la mejora en la gestión empresarial y la satisfacción de las demandas de bienes y servicios a través de la ingeniería de la confiabilidad. Para iniciar se tiene que definir qué es la confiabilidad, sus principales componentes y su relación con la disponibilidad y la mantenibilidad.

Los conceptos y técnicas para el análisis de confiabilidad de componentes, equipos y sistemas han estado asociadas al desarrollo de complejas tecnologías de alto riesgo, tales como la aeronáutica, la militar y la nuclear (San Martín C, 2018). Las primeras preocupaciones surgieron en el sector aeronáutico. En la década de los 50's comenzó el desarrollo de la industria nuclear, y los conceptos relacionados con la confiabilidad fueron empleados de forma creciente en el diseño de las plantas nucleares y de sus sistemas de seguridad. Hasta principios de los años 60's los estudios teóricos y prácticos sobre confiabilidad eran realizados fundamentalmente en los Estados Unidos y la Unión Soviética (Moubray J, 2000) (Keith M, 2008). Más adelante los estudios se extienden hacia otros países y también hacia otras esferas. Además, tiene lugar un gran desarrollo de los fundamentos y de los conceptos teóricos relacionados con la confiabilidad, y se produce la consolidación de la teoría de la confiabilidad (Mora L, 2008) (Yanghui T, 2020). Todos los sistemas de ingeniería, simples y complejos, pueden beneficiarse con la aplicación integrada de los conceptos de esta teoría en sus fases de planeación, diseño y operación (Pérez R, 2024). A corto plazo, un aumento de la confiabilidad conlleva al aumento de los costos. Pero este aumento de la confiabilidad puede revertirse en ganancia en un plazo mayor, y puede significar, por otra parte, una disminución de riesgos para la salud y la vida de las personas, y para el medio ambiente (Knezevic J, 1996). Ahora, el aumento de los costos debe compensarse con la disminución del riesgo, es decir, se debe establecer una adecuada relación entre el costo y el beneficio que se obtendrá, con el fin de no exagerar ni escatimar las provisiones de seguridad. (Moubray J., 2000) (Knezevic, 1987)

En un principio, la teoría de la confiabilidad se ocupaba principalmente de los fallos de los sistemas. Sin embargo, no indaga tanto en los fenómenos que los causan, sino en la frecuencia con que ocurren. Por lo tanto, no es una teoría física de los fallos, sino una teoría estadística, una teoría de probabilidades. (Lyonnet, P., 1991) (Kritsoz V, 2000)

Existen causas raíces de cada avería, la condición de la parte dañada va cambiando hasta llegar al fallo (Mohammadreza, 2017). Al ser conscientes de la causa principal del fallo, y observando el estado de los componentes, puede lograrse un alto nivel de confiabilidad. (Odofin S., 2018). La

confiabilidad de las partes giratorias se ve afectada por las condiciones de funcionamiento. (Sarraf, A. 2018).

Se puede resumir que una turbina en funcionamiento es un sistema que trabaja en una determinada situación, caracterizada por una serie de parámetros, que se pueden considerar como la “carga”, que no debe superar un determinado límite, para que no se produzcan fallas: a este límite se le puede tomar como la “resistencia”. En este caso la confiabilidad se define como la probabilidad de que la resistencia exceda la carga. Se conoce que, para aquellos activos, que se caracterizan por tener un “modelo de vida teórico” con una zona de desgaste, en la cual la condición se deteriora exponencialmente, se pueden encontrar parámetros, que son sensibles a esos cambios de la condición y que de forma confiable pueden ser medidos. Otros equipos, con modelos de vida diferente a la curva de la bañera y que están próximos a fallar, siempre presentan “síntomas” de su mal funcionamiento. Estos parámetros síntomas pueden ser tomados como la “carga”, mientras que los valores condenatorios o límites, que no deben ser excedidos pueden actuar como la “resistencia”.

### 1.3.1 Confiabilidad operacional y fallo funcional

Según Nachlas, la mayoría de los autores reconoce que los artículos manufacturados tienen vida finita, y que un mejor diseño de los productos implica una vida funcional más larga (Nachlas J, 1995) (Keith M, 2008). Se tienen ejemplos de fallos importantes en la historia del mantenimiento y la operación: fallos de fatiga en el fuselaje de un avión, la pérdida del motor de un avión comercial, el trágico accidente del Titanic, los accidentes de los reactores nucleares de Three Mile Island y Chernobil, y el accidente del transbordador espacial Challenger, la gran avería en el Macondo oil spill en Mexico, son algunos ejemplos muy conocidos de fallos catastróficos de sistemas (Notas del autor). Casi todo el mundo ha experimentado fallos de sistemas a menor escala, como el de un electrodoméstico, el desgaste de una batería, el fallo de los neumáticos de un automóvil, o el fallo de una bombilla.

Se debe notar que los ejemplos anteriores tienen características comunes, sin embargo, existen diferencias importantes entre ellos. Eligiendo dos casos extremos, el fallo de una bombilla y el accidente nuclear de Three Mile Island, se visualiza un contraste aclaratorio. El accidente de Three Mile Island fue causado por el fallo de un componente físico. El accidente también estuvo influenciado por la respuesta humana al fallo del componente y por las políticas de decisión establecidas. Por el contrario, el fallo de una bombilla y sus consecuencias normalmente no están

relacionados con decisiones ni rendimientos humanos, sino con el desgaste natural por el uso. (Nachlas, 1995)

Knezevic reconoce sólo dos estados en los que se puede encontrar un equipo determinado: estado de funcionamiento y estado de fallo (Knezevic J, 1996). Sin embargo, Evtech considera que los equipos no fallan de repente, sino que poco a poco van perdiendo su capacidad de resistencia a las condiciones de funcionamiento, hasta que finalmente se produce el fallo funcional (Evtech, 2019). Más abajo se muestra la Figura 1.2, llamada “curva P-F”, en la cual el eje X representa el tiempo de operación, mientras que en el eje Y representa la resistencia al fallo. Comenzando por el extremo izquierdo de la curva se encuentra el punto P, conocido como fallo Potencial. Este es el punto en el tiempo, cuando se puede detectar un cambio en la resistencia al fallo con el empleo de alguna técnica predictiva. Continuando hacia la derecha a lo largo de la curva, la resistencia al fallo comienza a decrecer, hasta encontrar el punto F, conocido como fallo funcional. Este es el punto en el tiempo, cuando la resistencia al fallo se ha deteriorado tanto, que ya el componente no puede cumplir con la función, que por diseño se le ha asignado. El tiempo transcurrido entre los puntos P y F es conocido como el intervalo P-F. La importancia de conocer el intervalo P-F de un componente determinado, para un modo de fallo específico, radica en que se puede establecer, con alta eficacia, el periodo de muestreo correcto de la técnica de inspección apropiada.

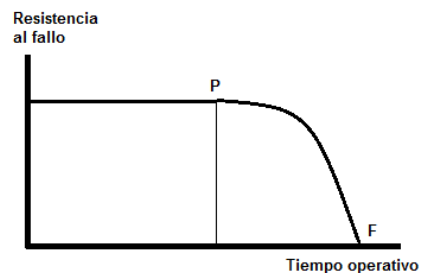


Figura 1.2. La curva PF. (EVTECH, 2019)

El concepto de fallo, como se mencionó más arriba está muy relacionado al de confiabilidad, por lo que tomando en consideración los criterios anteriores, Altmann entiende por confiabilidad operacional la capacidad de una instalación o un sistema integrado por procesos, tecnología, y personas para cumplir su función dentro de los límites de diseño y bajo un contexto operacional específico. (Altmann C., 2010)

El concepto de confiabilidad operacional lleva implícito un enfoque sistémico, basado en el conocimiento para la eliminación de las causas de los fallos, tanto humanos, como de equipos y de

procedimientos, para poder eliminar los factores de baja confiabilidad, que afectan a los procesos críticos y la rentabilidad total de la empresa. La confiabilidad operacional se forma de la confiabilidad del factor humano, la del mantenimiento, la del equipo y la del proceso (San Martín, C. 2018) (Poveda A, 2011) (Espinosa F, 2019)

Altmann C. al desarrollar su teoría sobre la aplicación del análisis de causa raíz, retoma el concepto de confiabilidad operacional dado por Nachas J, y define además los factores que integran este concepto (Altmann C, 2010) (Nachlas J, 1995). A continuación, se presentan las definiciones dadas por Altmann.

Confiabilidad del factor humano: Depende de la capacitación, la motivación e incentivación de las personas y de las herramientas a su disposición. Es conocido, que el éxito del factor humano está relacionado con el saber, el querer y el poder; así como con la motivación y la estimulación.

Confiabilidad de los procesos: Implica la operación de equipos y sistemas dentro de los parámetros, o por debajo de la capacidad de diseño, sin generar sobrecarga a los equipos, y el correcto entendimiento de los procesos y procedimientos de operación y mantenimiento.

Confiabilidad del Mantenimiento o Mantenibilidad: Es la probabilidad de que un equipo pueda ser restaurado a su estado operacional en un período de tiempo determinado. Entre otros factores, depende del diseño y la complejidad tecnológica de los equipos (confiabilidad inherente de diseño) y de la confiabilidad del factor humano. Se puede medir a través del indicador MTTR: Tiempo Medio Para Reparar.

Confiabilidad de equipos: Determinada por la estrategia, la eficacia y la efectividad del mantenimiento combinado con la operación. Se puede medir a través del indicador MTBF: Tiempo Medio Entre Fallas.

Al estudiar la confiabilidad operacional en toda su extensión, se necesita un análisis detallado de cada uno de los aspectos relacionados anteriormente, a lo cual se le han dedicado numerosos trabajos e investigaciones, como el libro “Mantenibilidad” de Joel Nachlas. (Nachlas J, 1995) y Altmann (Altmann C, 2010).

La presente investigación sólo pondrá énfasis en la confiabilidad de los equipos, en el entendimiento, que los demás factores se cumplen bajo las condiciones de operación, previstas en

el diseño, y protocolos correctos de operación y mantenimiento., y que el desempeño seguro de los equipos sólo depende de su capacidad para resistir las cargas que se le impongan.

Haciendo un resumen de las definiciones de diferentes autores, la revista “Lifetime Reliability” del sitio reliabilityweb.com, presenta los conceptos siguientes:

“La confiabilidad es la probabilidad de que un elemento de la planta va a cumplir su función sin fallar durante el periodo de diseño” (Definición formal)

“La confiabilidad es la oportunidad de completar la misión” (Definición militar)

“La confiabilidad es la oportunidad de tener éxito” (Definición de LRS)

“Podemos ganar confiabilidad diseñando y fabricando algo, que puede cumplir su función y previniendo sus fallos durante el uso” (LRS utiliza el Plant Wellness Way (debilidades de la planta)

Entonces se puede llegar a la siguiente definición (notas del autor):

“Confiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo realice adecuadamente la función prevista, a lo largo del tiempo determinado, cuando opera en el entorno para el que ha sido diseñado”. Debe observarse que hay cuatro atributos específicos de esta definición. Estos son: (1) probabilidad; (2) funcionamiento adecuado; (3) calificación con respecto al entorno; y (4) tiempo. Además, se centrará la atención en la confiabilidad de los equipos. Matemáticamente se expresa:

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

Donde  $R(t)$  es la confiabilidad,  $\lambda$  es la tasa de fallo (en fallos por hora) y  $t$  es el tiempo en días.

Como la confiabilidad designa la probabilidad de que un sistema cumpla satisfactoriamente con la función para la que fue diseñado, durante determinado período y en condiciones especificadas de operación, un evento que interrumpa ese funcionamiento se denomina fallo (Knezevic J, 1996). Por consiguiente, el fallo del sistema puede ser definido como un suceso, cuya realización provoca, o bien la pérdida de capacidad de realizar las funciones requeridas, o bien la pérdida de la capacidad para satisfacer los requisitos especificados. Independientemente de las razones de su aparición, un fallo causará la transición del sistema desde su estado satisfactorio a uno nuevo insatisfactorio, conocido como estado de fallo (Cabrera J, 2003).

## 1.4 Métodos de evaluación de la confiabilidad de equipos

Una vez abordados los conceptos de confiabilidad y fallo, así como el alcance respecto a la presente investigación, a continuación, se analizan varios métodos de valoración con sus fortalezas y debilidades para cumplir los objetivos propuestos.

### 1.4.1 Metodología de Weibull para el cálculo de la confiabilidad

Según Abernethy, el análisis de Weibull es la técnica mayormente elegida para estimar la probabilidad del fallo, basada en datos medidos o asumidos (Abernethy, R., 2011). La distribución de Weibull descubierta por el sueco Walodi Weibull, fue anunciada por primera vez en 1951 (ver Anexo 1). La distribución de Weibull es útil por su habilidad para simular un amplio rango de distribuciones como la Normal y la Exponencial, entre otras. Las técnicas discutidas en la distribución de Weibull son similares a las usadas con las distribuciones Normal y Log-Normal. La ecuación (1.1) es la distribución acumulativa de Weibull:

$$F(t) = 1 - e^{-\left\{\frac{(t-t_0)}{\eta}\right\}^{\beta}} \quad (1.1)$$

Donde:

e es el número de Euler  $e = 2.718281.....$

t = Parámetro de interés o valor en x

$t_0$  = valor inicial en x (tercer parámetro de Weibull)

$\eta$  = Vida característica

$\beta$  = Factor de forma

La presente investigación desestima el método de Weibull, porque no relaciona la tasa de fallos con los parámetros de la operación, por lo que no permite encontrar directamente, las acciones para evitar el fallo, como tampoco apunta hacia las causas de los fallos, y no permite determinar las acciones de mantenimiento, de forma anticipada. Necesita muchos datos de fallos, cuando el propósito es evitarlos.



### 1.4.2 Predicción de la confiabilidad basada en el historial de fallos

Para equipos reparables existen cinco posibles estados en los que ellos pueden quedar, una vez reparados después de un fallo: (Yañez, M. Joglar, F. Modarres M, 2002)

1. Tan bueno como nuevo
2. Tan malo como antes de fallar.
3. Mejor que antes de fallar, pero peor que cuando estaba nuevo.
4. Mejor que nuevo.
5. Peor que antes de fallar.

Según Yañez, los modelos probabilísticos tradicionalmente usados en análisis de confiabilidad, se basan en los estados 1 y 2 (estados límites), sin tomar en cuenta los estados 3, 4 y 5 a pesar de que en la práctica, el estado 3 es el más realista. La razón para esto radica en la dificultad de desarrollar una solución matemática para modelar este estado. Por otra parte, Yañez muestra un modelo probabilístico, al que denomina “Proceso generalizado de restauración (PGR)” (Yañez, M. y Perdomo J. 2003). El autor establece una nueva plataforma conceptual para el análisis de confiabilidad en equipos reparables, la cual se ajusta en mayor grado a lo que sucede en la realidad, eliminando las desviaciones derivadas del uso de los análisis tradicionales, especialmente en cuanto a la predicción del número esperado de fallos y el tiempo para el próximo fallo. (Yañez, M. Joglar, F. Modarres M, 2002)

La ecuación básica del PGR tiene su base en distribuciones probabilísticas de Weibull condicionales (Yañez, M. y Perdomo J. 2003) y es la siguiente (1.2):

$$C(t_i) = e \left[ \left( \frac{q}{\alpha} \sum_{j=1}^{i-1} t_j \right)^\beta - \left( \frac{t_j + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (1.2)$$

A partir de esta ecuación básica y de la data de fallos ( $t_i$  = tiempos de operación entre fallos sucesivos) se calculan los parámetros “ $\alpha$ ”, “ $\beta$ ” y “ $q$ ”, cuyo significado es:

$\alpha$ : parámetro de escala

$\beta$ : parámetro de forma

$q$ : parámetro de efectividad de la reparación

Este parámetro puede interpretarse, según su valor, de la siguiente forma:

$q = 0$  tan bueno como nuevo

$0 < q < 1$  mejor que como estaba, pero peor que cuando era nuevo

$q = 1$  tan malo como estaba

$q < 0$  mejor que nuevo

$q > 1$  peor que como estaba

Para obtener los parámetros con este método existen dos alternativas dependiendo del momento de ejecución del análisis:

- a. Método de estimación de la máxima probabilidad de ocurrencia (MPO), para aquellos casos en los cuales hay suficiente data disponible para el ciclo en análisis.
- b. Teorema de Bayes para aquellos casos en los que no hay suficiente data disponible del ciclo en análisis.

Una vez estimados los parámetros de PGR es posible predecir el número esperado de fallos  $\lambda(t)$ , empleando un proceso iterativo basado en simulación de Montecarlo (Yañez, M. Joglar, F. 2002) (Kritsov, V. 2000).

La presente investigación desestima este método a pesar de tener ventajas sobre el de Weibull, porque no relaciona la tasa de fallos con los parámetros de la operación para evitar el fallo, como tampoco apunta hacia las causas de los fallos, y no permite determinar las acciones de mantenimiento, de forma anticipada.

### 1.4.3 Aplicación de estadísticos como indicadores de confiabilidad

Wang T demuestra que, con el desarrollo de la industria de la energía eólica, el monitoreo del estado se ha convertido en una de las formas más importantes de mejorar la confiabilidad de las turbinas eólicas (Wang. 2021). Propone el método WTCM impulsado por datos basado en una nueva técnica de análisis multivariante para la estimación de estado, que puede realizar la alerta temprana de fallas de los componentes de la turbina. Para reducir la redundancia de información de los parámetros operativos, el algoritmo de selección de características de información mutua

condicional máxima, se aplica a los datos de entrenamiento. Para mejorar el rendimiento y la flexibilidad del algoritmo, se propone un método de construcción de una matriz de memoria dinámica, basado en el algoritmo del vecino más cercano, que puede proporcionar una matriz de memoria dinámica, que varía en el tiempo real con la condición operativa actual. Se proponen dos métodos, basados en residuos para realizar una alerta temprana de fallos. El método en tiempo real se basa en los residuales en tiempo real y si varios residuales consecutivos superan el umbral, se emitirán las alertas de fallo. El método a largo plazo divide los residuos históricos en niveles diarios y los analiza en base a gráficos de control. El método propuesto se aplica a dos casos reales de fallos por sobrecalentamiento de la caja de cambios y del cojinete del generador.

De la Torre propone la aplicación del control estadístico multivariable de proceso al comportamiento de la turbina, que se realiza a partir de la determinación del estadístico  $T^2$  de Hotelling y su posterior representación como forma de control estadístico tipo Shewhart para procesos multivariados (ver Anexo 2) (De la Torre, F. 2005). El estadístico  $T^2$  de Hotelling engloba el análisis conjunto de la variabilidad de los valores de los parámetros síntomas de comportamiento mecánico dinámico funcional de la turbina, siendo tomada como fuente de datos de estas variables, la generada por el sistema de monitoreo, instalada en la turbina. El estadístico  $T^2$  de Hotelling refleja la manifestación conjunta global de cambio cuantificable de la variabilidad de los valores de los parámetros, como resultado del comportamiento de la máquina. Por lo tanto, la evaluación del comportamiento del proceso se realiza mediante la detección de la desviación de la condición normal estándar, a partir de la comparación contra una referencia umbral que delimita la condición normal.

Esto no significa detectar un patrón anómalo correspondiente o asociado a un defecto de la turbina en particular, sino detectar que el grupo de instancias de mediciones para todas las variables se corresponde o no con el patrón de comportamiento normal. Para la aplicación del modelo, el establecimiento de un patrón de variabilidad de comportamiento normal durante la operación presupone las condiciones siguientes:

- Las condiciones que generan un comportamiento o estado normal, durante el tiempo entre mantenimientos, bajo condiciones normales de operación y velocidad de deterioro constante de los elementos de la máquina, suponen que la variabilidad en las lecturas de las variables se deba sólo a causas aleatorias normales inherentes al proceso.

- Las causas aleatorias que provocan variación durante el proceso normal, generan valores cuya distribución es considerada normal.
- Se asume que la velocidad de deterioro de los elementos de máquina durante el tiempo de explotación ocurra de forma uniforme y constante, por lo que se presupone que la velocidad de deterioro constante implique una variación lineal de las variables síntomas involucradas en el análisis.

La presente investigación reconoce el aporte del método como alerta temprana del desarrollo de fallos en la turbina de vapor, de gran utilidad para el monitoreo continuo, asociado a los sistemas de vigilancia instalados para la protección de la turbina. Sin embargo, el método no permite cumplir los objetivos propuestos, ya que una vez que surja la alerta, no existen criterios para proponer los cambios en los parámetros de operación y evitar o retardar la ocurrencia del fallo, ni tampoco permite determinar las acciones correctas para la reparación o mantenimiento.

#### 1.4.4 Cálculo de confiabilidad en base a datos del monitoreo de la condición

Los sistemas de vigilancia pueden comprender módulos de monitoreo y diagnóstico de la planta, e incluir el procesamiento de los datos de los transitorios, sistemas de alerta temprana, dirigidos a la detección de fallos ocultos y problemas en desarrollo, el seguimiento y los informes de diagnóstico, informes de evaluación de la planta y otras operaciones y servicios relacionados, que ayudan a los operadores en el desarrollo de programas de mantenimiento de sus plantas individuales, y evitar interrupciones innecesarias y paradas no programadas. Todo esto lleva a condicionar los programas orientados de mantenimiento, que permiten extender los intervalos de servicio, si las unidades son operadas en los modos de funcionamiento flexible y al mismo tiempo permite utilizar al máximo el tiempo de vida real de los componentes críticos, antes de tener que programar reparaciones, si las unidades se operan en modos severos.

Para el caso de la turbina de vapor, esto significa protegerla contra el exceso de velocidad, la inducción de agua, la pérdida de aceite lubricante, vapor corrosivo, las válvulas que se pegan, y cualquier otro riesgo de fallo o evento de problemas de vida, que podrían causarle daños importantes y obligar a paradas forzadas. (Latcovich J et. at, 2005), (Bagaviev, A. 2004)

El análisis de riesgo de averías repetitivas en la maquinaria, frecuentemente está ligado con la búsqueda de las causas de esos fenómenos (Dekys V., 2016). Si la tecnología es parte de la máquina

con partes rotatorias, y existen evidencias, que sugieren elevados niveles de vibración, entonces uno de los caminos para eliminar este riesgo, es entender los síntomas de las vibraciones.

Según Knezevic J, las tareas de mantenimiento se realizan obligatoriamente en un momento predeterminado  $t$ . La programación de las tareas de mantenimiento se basa en las características de confiabilidad de los elementos considerados, de acuerdo con la expresión (1.3), que sigue: (Knezevic, J. 1987)

$$R(t) = P(t_f > t) = R \quad (1.3)$$

Donde  $t_f$  es una variable aleatoria que representa el tiempo hasta el fallo,  $R$  es el nivel de fiabilidad exigido y  $R(t)$  el valor de la función de fiabilidad en el instante  $t$ .

Knezevic J. desarrolló una metodología para determinar la confiabilidad, basada en un estimador adecuado de la condición, RCP. Este nuevo método suministró información adicional sobre el cambio de la condición de los elementos considerados, durante la vida operativa. En consecuencia, se desarrolló un nuevo método de control de los procedimientos de mantenimiento (Knezevic, 1987).

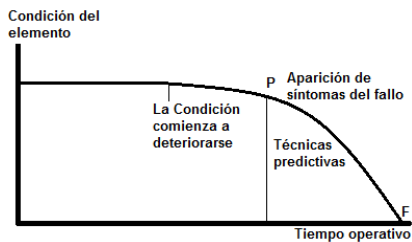


Figura 1.3. Cambio de la condición en el tiempo. (Elaboración propia del autor)

En la Figura 1.3 puede observarse que, en cierto momento de la vida del elemento analizado, comienza a desarrollarse un defecto, el cual no necesariamente tiene que estar relacionado con la edad operacional. La misión del diagnóstico será “descubrir” la presencia de este defecto antes de que se desarrolle lo suficiente como para que se produzca el fallo funcional. (Cabrera J., 2003)

Existe un grupo de “parámetros síntomas” o RCP que, debido a su versatilidad, posibilidades de medición y su relación con el estado del elemento estudiado, se utilizan de manera preferencial para evaluar la condición de los activos. Por lo tanto, un problema a resolver en tal sentido es dar seguimiento a la variación de dichos parámetros y determinar cuál es el valor de éstos, que se considera como fallo potencial.

Es deseable identificar el fallo potencial en su etapa más temprana, lo cual dependerá de la técnica predictiva que se utilice. El hecho de detectar anticipadamente el fallo funcional es esencial, por cuanto se dispondría de más tiempo para adoptar acciones necesarias, que eviten la ocurrencia del fallo funcional.

El método convencional para determinar la confiabilidad a través del tiempo hasta el fallo, considera al elemento como una caja negra, que realiza la función requerida hasta que falla. Tal método es totalmente satisfactorio desde el punto de vista de la estadística matemática, pero no tanto desde el punto de vista de ingeniería, ya que los ingenieros desean conocer lo que está sucediendo dentro de la caja negra.

Para lograrlo, es necesario describir la condición de un elemento en cualquier instante. Esta fue la principal razón para introducir el concepto de un estimador adecuado de la condición. Se define un parámetro, que está ligado directa o indirectamente con el elemento y sus prestaciones, y que describe la condición del elemento durante su vida operativa, satisfaciendo los requisitos siguientes:

- a. Descripción completa de la condición del elemento.
- b. Cambio continuo y monótono durante el tiempo operativo.
- c. Definición numérica de la condición del elemento.

Según este método, un elemento está en estado de funcionamiento en tanto que su estimador de condición se encuentra dentro del intervalo definido por su valor inicial,  $RCP_{in}$ , y su valor límite  $RCP_{lim}$ . Cuando este estimador rebasa el límite prescrito, se presenta la transición al estado de fallo.

El estudio de los procesos de cambio en la condición demuestra que es imposible su predicción, porque están condicionados tanto por factores externos como por la evolución de procesos físicos que ocurren en el interior del elemento durante la vida operativa. Por consiguiente, en todo momento del tiempo operativo, el estimador de la condición,  $RCP(t)$ , es una variable aleatoria, que sólo puede expresarse mediante su distribución de probabilidad. La función de densidad del estimador de condición en un instante de tiempo  $t$ , se expresa mediante  $f_{RCP(t)}(C)$  (ver Figura 1.4).

Por tanto, la probabilidad de que el estimador de condición se encuentre dentro del intervalo admitido, en el instante t, es también la probabilidad de operación satisfactoria del elemento, lo que no es más que la confiabilidad (1.4):

$$P(RCP_{in} < RCP(t) < RCP_{lim}) = \int_{RCP_{in}}^{RCP_{lim}} f_{RCP(t)}(C) dC = R(t) \quad (1.4)$$

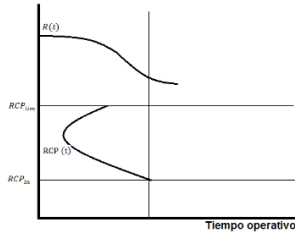


Figura 1.4. Representación de la confiabilidad en el momento t (Knezevic, 1987)

En el Anexo 4, se expone el monitoreo de la condición, en el cual se basa este método.

La presente investigación toma de este método la importante recomendación del uso de los datos recolectados por los sistemas de monitoreo, así como la posibilidad de reconocer la distribución de la confiabilidad por métodos estadísticos, para evaluar la confiabilidad. Sin embargo, se reconoce, que estos sistemas de monitoreo sólo reconocen el fallo una vez que exista, y no pueden determinar la probabilidad de su desarrollo producto a condiciones inadecuadas de operación, como tampoco pueden determinar fallos de la integridad física de los elementos de la turbina como corrosión, erosión, agrietamiento, ni la pérdida de propiedades mecánicas, es decir, mecanismos de degradación del metal, que aumenten la probabilidad de ocurrencia de fallos. Este método es excelente para implementar el Mantenimiento Predictivo, no así para el Mantenimiento basado en la Condición.

#### 1.4.5 Análisis “carga-resistencia” para estimar la confiabilidad

El análisis carga-resistencia tiene como premisa el hecho de que los fallos son el resultado de la aplicación de una carga que excede la resistencia del elemento analizado. Los términos “carga” y “resistencia” son utilizados en el sentido más amplio de la palabra; por ejemplo, para una tubería la carga pudiera ser la presión de operación, mientras la resistencia se caracteriza a través del espesor de la pared (Hernández H, 2010). La experiencia demuestra que la distribución de los parámetros de las muestras tomadas en el campo de la industria se aproxima a la distribución normal, si el tamaño de la muestra es grande. La distribución normal  $N(\bar{X}, S)$  es un modelo

matemático que rige muchos fenómenos y está definida por dos parámetros: la media  $\bar{X}$ , y la desviación estándar  $S$ . Se presenta mediante una curva simétrica conocida como campana de Gauss (Figura 1.5) y su distribución acumulada (Figura 1.6), ecuaciones (1.5) y (1.6). Esta distribución nos da la probabilidad de que, al elegir un valor, éste tenga una medida contenida en unos intervalos definidos. Esto permitirá predecir de forma aproximada, el comportamiento futuro de un proceso, conociendo los datos del presente. (Nachlas, J. 1995.) (Del Castillo, A. 2003), (Lyonnet P., 1991)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{X}}{S}\right)^2} \quad (1.5)$$

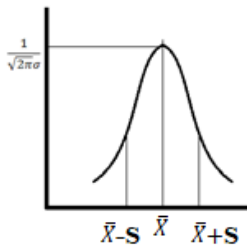


Figura 1.5. Función de distribución normal, campana de Gauss (Del Castillo, A. 2003) (Hernández, 2010)

Esta función de densidad se caracteriza por tener una función de densidad acumulada descrita por:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{v-\bar{X}}{S}\right)^2} dv \quad (1.6)$$

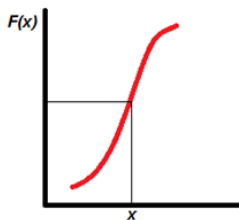


Figura 1.6. Función de densidad acumulada (Del Castillo, A. 2003) (Hernández, 2010)

Cuando la media de la distribución  $\bar{X}$ , es 0 y la varianza  $S$  es 1, la distribución se denomina "normal tipificada"  $N(0,1)$ , y su ventaja reside en que hay tablas donde se recoge la probabilidad acumulada para cada punto de la curva de esta distribución.



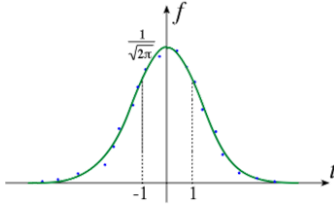


Figura 1.7. Función normal tipificada (Lyonnet P., 1991) (Hernández, 2010)

La tabla da la probabilidad acumulada, es decir, la que va desde  $-\infty$  hasta un valor dado, no da la probabilidad concreta en ese punto. En una distribución continua en la que la variable puede tomar infinitos valores, la probabilidad en un punto concreto es cero. Si se tiene una curva normal  $N(\bar{X}, S)$  y se quiere hallar las probabilidades a partir de las tablas de la normal estándar  $N(0,1)$  es preciso realizar un cambio de variable (tipificación) (Figura 1.7):

$$t = \frac{x - \bar{X}}{S} \quad (1.7)$$

La probabilidad de que  $x$  esté entre dos valores  $a$  y  $b$ , es igual a la probabilidad de que  $t$  esté en el intervalo entre  $(a - \bar{X})/S$  y  $(b - \bar{X})/S$ .

El objetivo del análisis de confiabilidad estructural es determinar la probabilidad del fallo de estructuras, tomando en consideración las incertidumbres asociadas con las resistencias y las cargas. La respuesta de una estructura se evalúa por medio de modelos basados en datos estadísticos recopilados previamente. La teoría de confiabilidad estructural toma como base el modelo probabilístico de estas incertidumbres y provee los métodos para la cuantificación de la probabilidad de que las estructuras no cumplan con la función para la que fueron diseñadas. Una variable básica es toda aquella cantidad involucrada y reconocida como fundamental en el cálculo de un estado límite. Un paso importante en el análisis de la confiabilidad es decidir cuáles cantidades deben ser modeladas como variables aleatorias, y cuáles deben ser modeladas como parámetros determinísticos.

Un estado límite es un evento predefinido, cuya ocurrencia debe evitarse para asegurar el adecuado comportamiento de la estructura. Se presume que es posible representar dicho evento, a través de un modelo matemático y calcular de este modo la probabilidad de ocurrencia. Para un elemento estructural, para el cual la capacidad (resistencia)  $C$  es modelada como una variable aleatoria, y sujeta a una demanda (carga)  $D$  también aleatoria, la función que representa dicho estado límite será simplemente:  $G(X) = C - D$ .

Donde C y D son funciones de las variables aleatorias, denotadas como  $X = (X_1, \dots, X_n)$ .

Estas variables aleatorias en X son conocidas como variables básicas, y pueden representar las incertidumbres físicas, las estadísticas y las de modelo. La capacidad y la demanda, por ende, son cada una función de las variables básicas aleatorias.

La función del estado límite o función de falla está definida de tal modo que los valores positivos de  $G(X)$  corresponden a situaciones seguras, y los negativos a situaciones de fallo. Por lo tanto, cuando es posible, es conveniente utilizar funciones de falla diferenciables para facilitar el trabajo de los procedimientos implementados con el fin de calcular la confiabilidad. En confiabilidad estructural la función de falla usualmente resulta del análisis mecánico de la estructura. El criterio de confiabilidad estructural se expresa normalmente en términos de ecuaciones de estados límite  $G(X)$ , también llamados eventos de fallo  $F: F = \{G(X) < 0\}$ .

La probabilidad de que sucedan eventos F viene dada por la probabilidad de que la demanda D supere a la capacidad C de la estructura (1.8):

$$P_f = P(C - D < 0) = P(C < D) \quad (1.8)$$

El cálculo de la probabilidad del fallo se puede efectuar resolviendo la siguiente integral:

$$P_F = P(C - D) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(C < x)P(x < D < x + dx)dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f(D)g(C)dx \quad (1.9)$$

La integral anterior calcula la probabilidad de que sucedan aquellos valores x en los que la capacidad C es menor a la demanda D, de tal modo que el fallo sucede (Bustamante A., 2010) (Zheng-Ming, 2019)

Como se conoce la confiabilidad es conceptualmente opuesta al fallo, por lo que:

$$\text{Confiabilidad} = \text{Probabilidad (Resistencia} > \text{Carga)}$$

(Yañez, M. & Gómez de la Vega, H., Valbuena G. 2003) (Meeker, W. y Escobar L. A., 1998) (Aguilar, J. y Cerrada, M. 2005) (Modarres, M., Kaminsky, M. y Kritsov, V. 1999) (Hernández, 2010)

La demanda impuesta o los efectos de las cargas D, en una estructura, y la capacidad o resistencia C, de la misma para un evento determinado, se pueden representar por dos curvas de distribución de probabilidad como se muestra esquemáticamente en la Figura 1.8.

La confiabilidad del trabajo de un elemento, que se encuentra bajo la aplicación de una carga, es la probabilidad de que su resistencia exceda la carga aplicada (Zheng-Ming, 2019). Asumiendo que la capacidad  $C$  y la demanda  $D$  son independientes, existirá siempre la posibilidad, aunque sea muy pequeña, de que  $C < D$  y que la estructura falle. Por el contrario, si  $C > D$ , la estructura es segura.

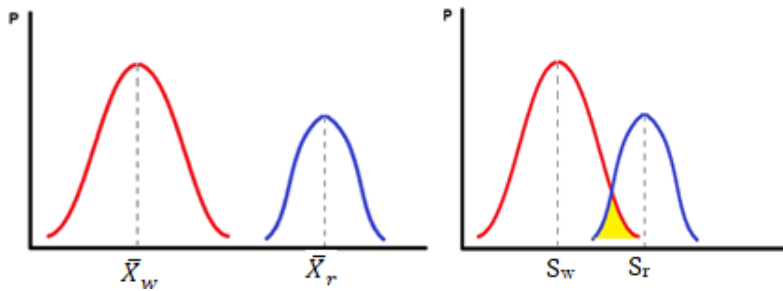


Figura 1.8. Comparación de distribución de probabilidades. a) no hay probabilidad de fallo, b) aparece probabilidad de fallo. (Elaboración propia del autor)

Cada distribución tiene su valor medio, denotado por  $\bar{X}_r$  para la resistencia y  $\bar{X}_w$  para la carga y sus desviaciones estándar  $S_r$  y  $S_w$  respectivamente. Esta operación matemática resulta en una nueva curva de probabilidades, que también es una función de distribución de probabilidad normal (Figura 1.9) con una función de distribución acumulada  $P_z$  (Figura 1.10) y con parámetros característicos  $S_m$  y  $\bar{X}_m$ , determinados por: (Hernández, H. A., 2010)

$$S_m = \sqrt{S_r^2 + S_w^2} \quad (1.10)$$

$$\bar{X}_m = \bar{X}_r - \bar{X}_w \quad (1.11)$$

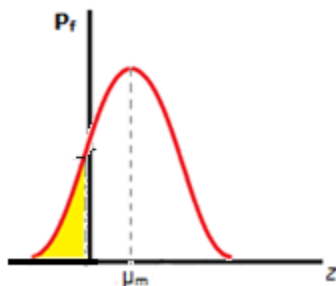


Figura 1.9. Nueva función de densidad de probabilidad (Zheng-Ming, 2019)

La probabilidad de fallo es dada por el área bajo la curva de distribución normal estándar desde  $-\infty$  hasta  $z$ , de manera que, cuanto menor sea la diferencia entre la resistencia media y el esfuerzo medio aplicado, y cuanto mayor sea la variabilidad de la dispersión, tanto de la resistencia como del esfuerzo aplicado, mayor será la probabilidad de fallo; así, al aumentar el traslape entre la distribución del esfuerzo y la distribución de la resistencia aumenta la probabilidad de fallo.

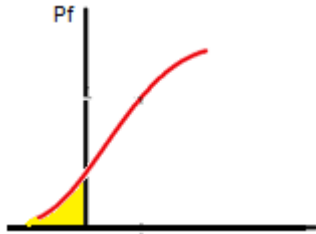


Figura 1.10. Distribución acumulada de probabilidad. (Elaboración propia)

Cuando la distribución de la condición medida o monitoreada en el equipo tiene algún solape con la distribución de la condición límite o criterio de rechazo, en ese momento aumenta la probabilidad del fallo. Si se considera que un fallo se presenta cuando el esfuerzo generado por la carga de servicio es mayor o igual que la resistencia, entonces la probabilidad de fallo  $P_f$  es dada por: (Hernandez A., 2000), (Muñoz E. 2008):

$$P_f = P[Z \leq z] = F(z) \quad P_f = P \left[ Z \leq -\frac{\bar{X}_r - \bar{X}_w}{\sqrt{S_r^2 + S_w^2}} \right] \quad (1.12)$$

Tanto los elementos individualmente como el activo en su conjunto, están diseñados y fabricados para resistir las condiciones del entorno de la operación, incluso con cierto margen de seguridad, entonces ¿por qué fallan los equipos? (Figura 1.11) (Lifetime Reliability. 2021)

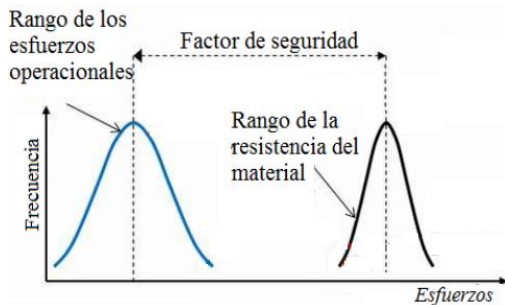


Figura 1.11. Rango de distribución de esfuerzos y resistencia. Elevado factor de seguridad (Lifetime Reliability. 2021)

Durante la operación se producen situaciones, en las que algunos de los parámetros de proceso toman valores superiores a los que se prevén en los procedimientos, lo que condiciona que se produzcan sobrecargas (Figura 1.12), lo que se refleja en el desplazamiento hacia la derecha de la distribución de los esfuerzos, y se pueden producir áreas de solapamientos de las distribuciones, y por tanto aumenta la probabilidad de que se vea superada la resistencia de los elementos más débiles.

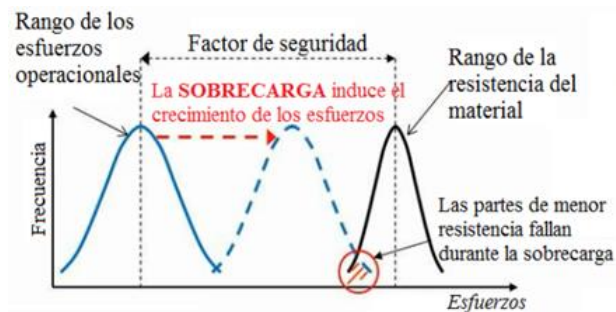


Figura 1.12. Rango de distribución de esfuerzos y resistencia. Sin factor de seguridad por sobrecarga (Lifetime Reliability. 2021)

Parámetros que pueden causar sobrecargas:

- Altas temperaturas
- Altas vibraciones
- Elevados flujos
- Elevadas concentraciones de elementos químicos
- Sobrepresiones
- Impactos

Por otro lado, bajo la acción del entorno de operación, los elementos de las máquinas pueden debilitarse, al disminuir sus propiedades, provocando el desplazamiento hacia la izquierda de la distribución que caracteriza la resistencia y nuevamente creando situaciones de solapamiento de las curvas (Figura 1.13).



Figura 1.13. Rango de distribución de esfuerzos y resistencia. Sin factor de seguridad por disminución de resistencia. (Lifetime Reliability. 2021)

Propiedades que cambian durante el tiempo de operación:

- Disminuye el espesor del metal
- Microestructura
- Formación de carburos
- Disminuye la plasticidad
- Disminuye la resiliencia
- Resistencia a la fatiga
- Resistencia máxima
- Límite de fluencia, ductilidad (fragilidad)

Para el caso de las Turbinas de vapor, que según Latcovich J. y Moroz L. (Laticovich J., 2005) (Moroz L., 2017) (García S., 2011) todas las turbinas de vapor en lo fundamental son la misma cosa, a pesar de las diferencias en cuanto a el diseño, la complejidad y los parámetros del vapor. Refiere Hernán L. (Hernán L., 2018) que las principales causas de falta de disponibilidad incluyen los fallos de álabes y cojinetes, las altas vibraciones, los fallos de válvulas de cierre y de control, así como los dispositivos de disparo y del sistema de aceite lubricante. Los eventos más frecuentes están relacionados con la pérdida del aceite de lubricación, mientras que los de mayor gravedad son los excesos de velocidad de giro.

Para el estudio y análisis de los mecanismos de fallos, inherentes a los elementos de las turbinas de vapor, fueron estudiados los trabajos de diferentes autores como Leyzerovich, Hernán, Moroz, García S., Pino. (Leyzerovich, 2008) (Hernán, 2018) (Latcovich J., 2005) (Moroz, 2017) (García S., 2011) (Pino, 2017). Además, se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos por las investigaciones de averías en más de mil rotores de turbinas de vapor en Rusia (Rezinskij B., 2006).

La erosión por partículas sólidas se define como la pérdida progresiva del material producto a los continuos impactos de partículas duras sobre su superficie. (Ritapure, 2019) (Wang, 2021) (Pinca, 2008) (Venkatesh, 2012). Dooley demuestra y describe las condiciones, bajo las cuales la magnetita se transforma en hematita, en la superficie interior de los tubos de sobrecalentadores y recalentadores, mientras Pérez Castañeda y Armit্ত demuestran bajo qué condiciones la hematita se fractura y exfolia, para ingresar en el flujo de vapor que se dirige a la turbina (Dooley, 2019) (Pérez, 2023) (Armitt, 2019). La resistencia de la superficie a la erosión, se puede evaluar asumiendo que una partícula rígida de masa  $m$ , y velocidad  $V$  causa una entalla de ancho  $2b$ , de forma similar a las expresiones propuestas por Vojnovich. (Wright, I. y Dooley, R., 2011) (Reshetnyak, H. 1995) (T. Vojnovich et al. 1977).

El vapor se humedece mientras se expande a lo largo de su recorrido por las últimas etapas del rotor de baja presión (LPR), y las gotas de agua pueden causar significativa erosión de los álabes (WDE) (Leyzerovich, 2008).

La entrada de vapor con temperatura diferente a la del metal, induce un choque térmico. Cuando el agua ingresa a una turbina que está girando a elevada velocidad, puede causar daños mecánicos significativos para los álabes, toberas y cojinetes de empuje, por lo que se ha requerido el uso de materiales refractarios, capaces de soportar temperaturas mucho más altas, que los materiales de ingeniería normales (Hu, J.S., Wang, B.L, 2020). Tanto Manson, como Pinca utilizan los estudios del choque térmico en una placa plana, para encontrar la distribución de temperatura, que puede provocar su fallo. Según Winterton, R., Moroz, Goloshumova, Incropera, Rezinskix, Camaraza y Rusin, para el caso del rotor de la turbina, el número de Nusselt se puede encontrar utilizando la ecuación de Dittus-Boelter. (Manson, 1953) (Pinca, 2008) (Winterton, 1997) (Moroz, 2017) (Goloshumova, 2016) (Incropera, 2000) (Rezinskix, 2006) (Camaraza, 2022) (Rusin, 2021).

El agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) es aquel, que es inducido por la influencia combinada de la tensión de tracción y un ambiente corrosivo (Sáenz L.A, 2020). Los datos experimentales de SCC son notorios por una amplia gama de dispersión (Caicedo J., Reyes. 2017).

Este fenómeno de agrietamiento tiene serias consecuencias, ya que puede ocurrir en esfuerzos dentro del rango de esfuerzo de diseño (Figura 2.7) (Imayer V. M. 2020) (Khalifeh A. 2019). Cuando aparece una grieta, se puede evaluar la probabilidad de fallo del elemento por corrosión bajo tensión, conociendo la temperatura de trabajo y su límite convencional  $\sigma_{0,2}$ , utilizando una ecuación empírica, obtenida por especialistas de Westinghouse, la cual coincide con investigaciones realizadas por General Electric y otras firmas rusas (Leyzerovich, 2008) (Sandor R. et al.,1982) (Rezinskix, 2005).

La respuesta inelástica del material es conocida como “fluencia lenta o creep”. Gran parte de los fallos ocurridos a altas temperaturas son atribuidos a fluencia lenta o a una combinación fluencia lenta con la fatiga (Sáenz, 2018). Una curva de fluencia lenta o creep es la representación gráfica del alargamiento (elongación) en función del tiempo, a una temperatura determinada y bajo condiciones constantes, obteniéndose un cambio dinámico del comportamiento del material, el cual (Imayer V. M. 2020). Para la evaluación del riesgo de fallo por fluencia (creep), es de uso general, el parámetro de Larson Miller y la evaluación de las tensiones correspondientes (Moroz, 2017) (Solano R. 1982) (Saenz L. 2020). En la presente investigación se tomaron las relaciones expuestas por Mendelson (Mendelson A, Ernest Roberts, and Munson S.S. 1965).

La falla por fatiga de los metales ocurre por carga aplicada en formas variables o repetidas que dan como resultado una fractura frágil sin deformación plástica notable (Sáenz L.A, 2020) (Moroz L.2017). Generalmente las grietas por fatiga se originan en alguna discontinuidad superficial como hendiduras o cambios de sección lo que origina concentraciones de esfuerzos. Se puede emplear la curva PF junto a las curvas de probabilidad para explicar cómo ocurre la evolución del activo. La Figura 1.14 muestra que, al principio del ciclo de vida, la probabilidad de fallo es baja, por lo que la curva de distribución de la carga es menor que la resistencia. Posteriormente, bajo las condiciones antes expuestas, la distribución de probabilidad de la carga, comienza a superar la resistencia del activo, por lo que disminuye el desempeño del activo, lo cual significa que aumenta la probabilidad del fallo.

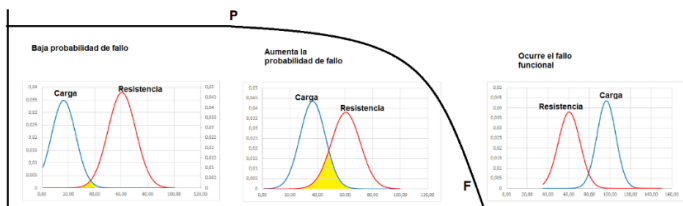




Figura 1.14. Representación de las curvas de distribución de probabilidad de fallo dentro de la curva PF. (Elaboración propia del autor)

La aplicación del método que compara la carga con la resistencia de los componentes, satisface el cumplimiento de los objetivos propuestos en la investigación actual, por lo que efectivamente, es el que sustenta la Metodología que se ha diseñado para evaluar la confiabilidad de la turbina de vapor en funcionamiento y se presenta en el Capítulo II del presente Informe.

## 1.5 Conclusiones parciales del capítulo

A partir de la revisión bibliográfica sobre la confiabilidad, se llegó a las siguientes conclusiones parciales:

1. Se realizó una revisión bibliográfica sobre el tema de la gestión del mantenimiento. Se analizaron numerosas publicaciones clásicas y actuales, en las cuales se aborda el tema desde diferentes puntos de vista, pero en las cuales se persiguen objetivos similares a los planteados en la actual investigación.
2. Se demostró que la evaluación de la confiabilidad por el método carga- resistencia, es el que mejor satisface las exigencias de la presente investigación, que resuelve el problema planteado, con el alcance requerido según las actuales exigencias, como son la de ayudar a gestionar el alcance y la urgencia (plazos para la ejecución) de las acciones para mantener un elevado nivel de confiabilidad de la operación. El RCM no acaba de encontrar una amplia aplicación, porque no estimula la aplicación de los métodos de diagnóstico, así como tampoco otras técnicas de evaluación del estado real de los activos.
3. Se encontró que algunos autores hacen mención a la aplicación del método de “carga y resistencia”, pero no encuentran una aplicación práctica y sus metodologías terminan implementándose con dependencia en el tiempo, en lugar de evaluar el estado de los equipos en base a indicadores o parámetros síntomas, que realmente reflejen la probabilidad de la ocurrencia inminente de un fallo.
4. Se constató la necesidad de la aplicación de una metodología, que permita gestionar el mantenimiento en base a la probabilidad de ocurrencia de fallos y averías, como es el método de “carga y resistencia”, pero encontrando expresiones que, relacionen los parámetros de operación (diagnóstico) con las características y propiedades de resistencia

de los activos a las condiciones que se le imponen durante el funcionamiento, lo cual se abordará en el próximo Capítulo de la presente Tesis. El estudio del método “carga-resistencia” ha permitido diseñar la Metodología.

# CAPÍTULO 2 IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL MÉTODO “CARGA-RESISTENCIA”

Una vez estudiados y analizados los métodos y metodologías de evaluación de la confiabilidad, se decidió que, el que mejor cumple las expectativas de la investigación es el de “carga-resistencia” para el que se ha desarrollado la siguiente Metodología para su implementación:

1. Estudio de la máquina bajo investigación (turbina de vapor), según el lugar que ocupa en el proceso tecnológico: función, criticidad, condiciones de funcionamiento, exigencias en cuanto a disponibilidad necesaria (de aquí la confiabilidad y la mantenibilidad), componentes.
2. Estudio de los mecanismos de degradación y la física de los fallos, para determinar las posibles averías en cada componente de la máquina, que pueden provocar su indisponibilidad (turbina de vapor). Se emplean diferentes herramientas de análisis:
  - 2.1. Análisis de causa raíz (RCA)
  - 2.2. Análisis FEMECA
  - 2.3. Inspección basada en riesgo (RBI)
  - 2.4. Estadísticas de fallos en el equipo analizado
  - 2.5. Criterios de expertos
3. Teniendo en cuenta los síntomas de cada mecanismo de fallo, se debe encontrar una expresión que, relacione los parámetros de operación con las propiedades de resistencia del elemento.
4. Extraer de las bases de datos de operación y diagnóstico, los valores de las variables que participan en las expresiones. Realizar los cálculos para la carga.
5. Determinar los parámetros estadísticos de la distribución normal, para los resultados obtenidos.

6. Extraer de los informes de fabricación y ensayos de los materiales, los valores de resistencia. Las propiedades de resistencia en sentido general, pueden ser diferentes a las propiedades mecánicas del metal. Encontrar los parámetros estadísticos de la distribución de la resistencia.
7. Calcular los parámetros característicos de la distribución resultante de probabilidad del fallo, al comparar la carga con la resistencia.
8. Determinar la distribución de probabilidades acumulada
9. Encontrar la probabilidad de fallo.  $Pf(C \geq R)$
10. Repetir los pasos del 2 al 9 para cada mecanismo de fallo
11. Determinar si el sistema es serie, paralelo o combinado. Calcular el coeficiente total de confiabilidad.
12. Evaluar los resultados comparando el nivel de confiabilidad obtenido con los criterios de aceptación
13. Recomendar acciones sobre los parámetros de operación y/o sobre las intervenciones o mantenimientos:
  - 13.1. Bajar carga
  - 13.2. Variar la presión
  - 13.3. Cambiar la temperatura
  - 13.4. Cambiar el % de apertura de válvulas de admisión o descarga
  - 13.5. Proceder a equilibrar los rotores
  - 13.6. Mejorar el alineamiento de ejes
  - 13.7. Ajustar las holguras en chumaceras
  - 13.8. Realizar aprietes controlados

A continuación, se aplica la metodología diseñada para el caso de la turbina de vapor.

## 2.1 Análisis de la turbina de vapor, sus componentes, funciones y mecanismos de fallo

En una central termoeléctrica, la turbina de vapor es el componente fundamental, por lo que su funcionamiento está íntimamente ligado a toda la planta. Las turbinas de vapor proporcionan un medio para convertir en torque y potencia, la energía del vapor saturado, sobrecalentado, o supercrítico, proveniente de los Generadores de vapor o de las Calderas de recuperación de calor (HRSG). En consecuencia, las turbinas de vapor se utilizan para conducir una gran variedad de equipos, de numerosos tamaños y velocidades, en casi todos los segmentos de la industria, incluyendo la generación de energía, pulpa y papel, hierro y acero, producción combinada de calor y electricidad y química, el petróleo y las industrias del gas (Latcovich J et. al, 2005) (Moroz L. 2017). Según Latcovich en lo fundamental, todas las turbinas son la misma cosa, a pesar de haber diferencias sustanciales en el diseño, la complejidad, la aplicación, los parámetros del vapor, y el tamaño. Ellas realizan la misma función, utilizan componentes principales y sistemas auxiliares similares, y están sometidas a los mismos mecanismos de fallo. Para apoyar el funcionamiento confiable de la turbina, es necesario que exista una infraestructura eficaz, para supervisar las condiciones de funcionamiento, la calidad del agua, del vapor, y la salud de la turbina de vapor, teniendo y usando procedimientos escritos de operación y mantenimiento, con la utilización de un sistema de gestión de mantenimiento para su programación y ejecución y para llevar a cabo la formación del personal de forma permanente.

Antes de definir un plan integral de mantenimiento (tareas y frecuencias) para las turbinas de vapor, que se ocupe de los mecanismos de fallos inherentes y sus causas, es importante revisar lo que ha sido la disponibilidad de la turbina de vapor y la experiencia de averías, ya que existen numerosas causas de averías de turbinas de vapor. (Hernán L., 2018). Las principales causas de falta de disponibilidad incluyen los fallos de álabes y cojinetes, las altas vibraciones, los fallos en las válvulas de cierre y de control, así como en los dispositivos de disparo de la turbina y los problemas del sistema de aceite lubricante. Los eventos más frecuentes han sido incidentes de pérdida de aceite de lubricación, mientras que los eventos de mayor gravedad han tenido relación con excesos de velocidad. Típicamente, los acontecimientos de mayor frecuencia y gravedad, han sido fallos en los álabes o ruedas de álabes, particularmente en la sección de baja presión de la turbina, en la que los álabes experimentan una serie de mecanismos de fallo como son: corrosión bajo tensión (SCC), erosión por partículas sólidas (SPE) o por gotas de agua (WED), daños por objetos extraños (FOD), que en última instancia conducen a la avería. (Hernán, 2018)

A continuación, se presentan los principales mecanismos de fallos que, sufren los elementos de la turbina de vapor según (Leyzerovich, 2008), (Hernan, 2018), (Latcovich J, 2005), (Moroz, 2017), (García S., 2010), (García S. 2011), (Pino, 2017)

Álabes estacionarios: La función de los álabes estacionarios es dirigir el flujo de vapor hacia los álabes de rotación en el ángulo y la velocidad correctos para la mayor eficiencia y extracción de energía. Los álabes de rotación deben convertir la energía del flujo (masa y velocidad) del vapor en velocidad de rotación y par motor del rotor. Los álabes de la turbina de vapor están sometidos a varios mecanismos de fallo durante el servicio (Tabla 1 del anexo):

- Corrosión
- Fluencia
- Erosión (por partículas sólidas y por gotas de agua)
- Fatiga (mecánica y térmica)
- Daños por caída de objetos propios (DOD) o extraños (FOD)
- Agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC)
- Fragilización

Discos, rotores, ejes, ruedas de paletas y diafragmas: Para transmitir el torque producido en cada etapa de la turbina, los álabes rotatorios se fijan a los discos o ruedas a través de una unión de forma, especialmente diseñada en la base de la paleta o de la raíz, la cual puede tener forma de árbol de abeto, con ranuras en forma de T, o con forma de abeto semicircular, o puede tener varios pasadores para sostener las hojas. Los discos de turbina se pueden ajustar sobre el eje, con una llave antirrotación, o pueden haber sido forjados en el eje como un conjunto integral. El disco de salida del eje del rotor, es decir el acople, se conecta al equipo accionado. Del mismo modo, las raíces de paletas estacionarias pueden estar unidas a ranuras en la carcasa, envolturas, o anillos de álabes, o pueden estar soldados al anillo de apoyo, para crear un conjunto de álabes estacionarios, que se les llama diafragma.

La masa y la inercia térmica de los rotores de turbinas de vapor y de las carcasas, pueden ser bastante grandes. Como tal, los gradientes de temperatura de los rotores y de las carcasas tienen lugar durante el arranque y los transitorios, por lo que deben ser controlados cuidadosamente, de

lo contrario se puede producir serios roces entre la partes giratorias y fijas y/o puede haber gran distorsión de los rotores y carcasas, cuando los gradientes son demasiado grandes o se producen demasiado rápido.

Los discos, ejes, rotores ruedas de paletas, carcasas y los diafragmas están sometidos a los mismos mecanismos de fallo y tienen las mismas causas, que se aplican a los álabes. No es raro encontrar una deformación permanente (creep), grietas de fatiga (térmicas y vibratorias) y corrosión bajo tensión, en los discos, rotores, carcasas, y en los diafragmas. A diferencia de los álabes, en los discos los mecanismos pueden tomar más tiempo para que el daño resultante se vuelva detectable, ya que estas partes tienden a ser más robustas en tamaño.

Cojinetes y sistemas de lubricación: Como en la mayoría de las máquinas rotatorias, en la turbina los cojinetes se utilizan para apoyar el rotor en el interior de los alojamientos, instalados en las carcasas. Es común que las turbinas de vapor más pequeñas utilicen rodamientos de elementos rodantes, mientras que las turbinas más grandes, utilicen cojinetes lisos de deslizamiento y cojinetes de empuje de múltiples tacos. Independientemente del tipo de turbina, es necesario que haya un sistema de lubricación completo, que ofrezca aceite lubricante fiable, limpio y fresco a los cojinetes. Para algunas turbinas, el aceite lubricante (generalmente aceite mineral) se utiliza para servomotores eléctricos y actuadores para válvulas de cierre y de control. En otros casos se utilizan fluidos hidráulicos (generalmente fluidos de tipo fosfato-éster, como por ejemplo el Filker, que pueden operar a presiones y temperaturas más altas sin riesgo de inflamarse), para proporcionar la potencia requerida para la operación de las válvulas. La confiabilidad del sistema de aceite lubricante es importante ya que los incidentes de pérdida de lubricación tienen las dos cosas, son eventos frecuentes y graves, para todos los tamaños de turbinas.

El acontecimiento más destructivo para una turbina de vapor es un evento de exceso de velocidad, ya que la turbina de vapor y su equipo conducido suelen ser catastróficamente dañados. Estos eventos, aunque poco frecuentes, se siguen produciendo en las turbinas de vapor, pequeñas y grandes, independientemente de la estación del año, el nivel tecnológico, la aplicación, o el tipo de sistema de control (digital, analógico, hidro-mecánico, mecánico) asociado a la turbina de vapor. La turbina de vapor puede utilizar un sistema mecánico de protección de sobrevelocidad, uno electrónico, o la combinación de estos sistemas para maximizar la protección. El dispositivo mecánico de sobrevelocidad consta de un pistón cargado por resorte, montado en el eje de la turbina en su parte delantera. Cuando la velocidad de la turbina alcanza la condición de

sobrevelocidad (es decir, 10% por encima de la velocidad nominal), el pistón se sale y golpea la palanca de la válvula de descarga de aceite, que provoca la despresurización del aceite de suministro a las válvulas de parada, disparo y regulación, y las válvulas de intercepción. Esto da lugar a que todas las válvulas se cierren de inmediato.

### 2.1.1 Condiciones de trabajo del metal, que limitan su vida útil.

Análisis basado en el estudio de más de 1000 rotores en la Universidad energética de Moscú. (Rezinskij B. 2006):

*Elevados parámetros del vapor.* A la entrada de las turbinas, el vapor llega con temperatura entre 500 y 600 °C y con presión de 8,8 a 23,5 MPa. Estos parámetros condicionan la aparición en el metal de procesos como la fluencia y las transformaciones estructurales activas, los que inducen la degradación de las propiedades del acero. Además, debido a las grandes dimensiones de los elementos, en los eventos de calentamientos y enfriamientos a altas velocidades, se puede observar la flexión del rotor, que conlleva a la pérdida de la capacidad de trabajo. El desarrollo tecnológico de los últimos años demanda materiales resistentes a temperaturas elevadas (turbinas, industrias químicas y petroquímicas, reactores nucleares, etc.) donde los materiales pueden sufrir deterioros mecánicos y/o químicos.

*Altas velocidades de rotación de los rotores.* La velocidad de giro de los rotores de gran tamaño, que es de 3600 rpm, induce la acción de elevados esfuerzos en el metal de la superficie del agujero central, así como en los radios de curvatura de los discos, que han sido forjados directamente en el rotor. En condiciones de desbalance del rotor, en las superficies de las zonas más críticas, surgen esfuerzos, que constantemente cambian de dirección, los cuales pueden traer consigo la formación de grietas, por el mecanismo de fatiga de ciclos largos.

*Defectos metalúrgicos iniciales.* Como regla general, en las secciones más gruesas de los elementos del cuerpo de la turbina, existen defectos iniciales, propios de la fundición, en forma de discontinuidades del metal, porosidades, solidificación no uniforme, entre otras. Durante la explotación prolongada de la turbina, estos defectos, constituyen iniciadores para la formación de grietas, las que encuentran posibilidad de crecimiento, bajo la acción de esfuerzos estáticos y cíclicos. En los rotores forjados, aunque en menor proporción, también se pueden encontrar defectos metalúrgicos iniciales. En la mayoría de los casos estos defectos se encuentran en la parte central de la forja, cerca del agujero central. Como regla, ellos son defectos alargados, orientados



a lo largo del eje del rotor, y ubicados en el plano de acción de las mayores tensiones de tracción. Las grietas, al desarrollarse desde estos defectos pueden provocar la ruptura frágil del rotor.

*Acción corrosiva del medio.* En la zona de cambio de fase del vapor, en las primeras gotas, ocurre un brusco aumento de la concentración de inclusiones dañinas, contenidas en el vapor recalentado. En esta zona de los álabes, rotores y diafragmas se observa la ocurrencia de procesos corrosivos (corrosión bajo tensión, llagas de oxidación, corrosión por pitting y fatiga por corrosión). Durante las paradas de mucha duración, sin realizar la conservación de las partes, la corrosión puede atacar a todos los componentes del camino del vapor, incluso a los que están más alejados de la zona del cambio de fase.

*Erosión causada por el flujo de vapor.* En la zona de alta humedad en la vena de vapor ocurre un proceso intenso de erosión y corrosión, sobre todo en los álabes, tanto fijos como móviles. En las turbinas para calefacción, se pueden encontrar elementos erosionados en los discos y bandajes de los diafragmas. Este hecho constituye un serio peligro para la explotación segura de las turbinas de vapor.

*Erosión por partículas sólidas.* La erosión por partículas sólidas se define como la pérdida progresiva de material producto de los continuos impactos de las partículas duras contenidas en el fluido de trabajo.

*Erosión por gotas de agua.* La erosión por gotas de agua se define como la pérdida progresiva de material producto de los continuos impactos de las gotas de agua, cuando parte del vapor cambia de fase.

## 2.2 Evaluación de la probabilidad de fallo de la turbina de vapor

Las máquinas rotativas no fallan al azar. Existen causas raíces de cada avería, la condición de la parte dañada va cambiando hasta llegar al fallo (Mohammadreza, 2017). Para eliminar el riesgo de fallo, es necesario conocer sus causas. Basándose en el conocimiento y el análisis de los mecanismos de fallos deben ser seleccionados los componentes críticos para el monitoreo. Se deben definir los parámetros adecuados, los sensores y los puntos de medición. Al ser conscientes de la causa principal del fallo, y observando el estado de los componentes necesarios, puede lograrse un alto nivel de confiabilidad. (Odofin S., 2018)

Las máquinas rotativas utilizan piezas que trabajan a alta velocidad, como los álabes de las turbinas de vapor, que giran para convertir la energía del fluido en energía mecánica y la generación de electricidad. La confiabilidad de estas partes giratorias (así como la confiabilidad de los auxiliares de la máquina) se ve afectada considerablemente por las condiciones de funcionamiento. (Sarraf, A. 2018)

Las fuentes de las fuerzas, que causan fallos, incluyen las siguientes: Aplicación

- La desalineación y el desequilibrio,
- Aumento de la carga de la tubería en la máquina (mala disposición de las tuberías, la desigual distribución del flujo, elevadas tensiones adicionales,
- El ensuciamiento de la máquina,
- Las fuerzas en la base (se consideran pies suaves, pie cojo),
- La expansión térmica (cambios en el circuito de enfriamiento con la temperatura superior a los límites de operación),
- El montaje o instalación incorrectos.

Teniendo en cuenta los resultados de investigaciones anteriores, expresadas en los informes de congresos, conferencias, libros y artículos, referenciados en el presente Informe, la investigación se dirigió a evaluar la probabilidad de fallo de la turbina de vapor por los mecanismos siguientes:

1. Erosión de los álabes por partículas sólidas
2. Erosión de los álabes por gotas de agua
3. Deformación y agrietamiento por choque térmico
4. Corrosión bajo tensión (SCC)
5. Deformación por creep (fluencia)
6. Agrietamiento por fatiga
7. Daños por altas vibraciones mecánicas

### 2.2.1 Estudio de la física del fallo por erosión por partículas sólidas

La erosión de los álabes de las turbinas de vapor ha sido uno de los fenómenos más frecuentes en los sistemas de generación de potencia. El impacto de partículas sólidas y gotas de agua puede resultar en problemas severos de erosión en los álabes, ocasionando altos costos de mantenimiento y reparación, así como problemas de seguridad y disminución de la eficiencia de generación de potencia.

Se analiza la erosión de los álabes de la turbina de vapor, bajo la acción de partículas sólidas, provenientes de los sobrecalentadores, en los cuales se forman capas de óxidos que, bajo determinadas condiciones, crecen hasta espesores críticos, y debido a la acción de esfuerzos, provocados por cambios térmicos, se fracturan y se desprenden, adquiriendo una energía tal, que al impactar en la superficie de los álabes les provoca la erosión. *En la presente investigación se ha obtenido una expresión, que permite la aplicación del método, la cual no ha sido encontrada en ninguna de las publicaciones analizadas.*

La erosión por partículas sólidas se define como la pérdida progresiva de material producto de los continuos impactos de las partículas duras contenidas en el fluido de trabajo (Ritapure, 2019) (Wang, 2021) (Pinca, 2008) (Venkatesh, 2012). La erosión por partículas sólidas se produce cuando el espesor de la magnetita (transformada en hematita, ver Figura 2.1) en los tubos de los sobrecalentadores y recalentadores de la Caldera, crece hasta valores críticos. Bajo la acción de esfuerzos, producto de los diferentes regímenes de arranques y paradas, los óxidos se fracturan y se desprenden, y al ser arrastrados por el vapor adquieren una energía cinética tal, que provocan la erosión de la superficie de los álabes, al impactar en los mismos. Pérez Castañeda (Pérez, 2023) demuestra que, en un periodo dado de operación, siempre surgen tensiones capaces de fracturar las escamas de óxidos. (B. Dooley, 2019)

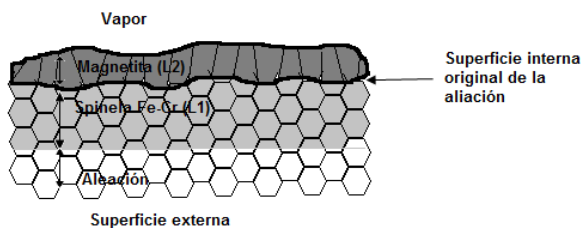


Figura 2.1. Diagrama esquemático de la sección transversal de la escama inicial, formada en vapor en los aceros ferríticos, que contienen hasta un 9% de Cr. (Dooley B, 2019)

Según Armitt se ha de esperar que, los restos de óxido de la Caldera en su trayectoria hacia la turbina, se rompan en partículas de forma aproximadamente cúbica, cuyas aristas tienen una longitud igual al espesor original (Armirt, 2019). Las escamas de los tubos austeníticos tienen normalmente un espesor entre 50 y 100  $\mu\text{m}$ , mientras que el de los tubos ferríticos, que causan erosión tiene un espesor de 250 a 1000  $\mu\text{m}$ . Lo descrito anteriormente, indica que existe una diferencia importante en la velocidad mínima requerida para el daño por erosión por las partículas de los tubos austeníticos y ferríticos. Por lo tanto, es necesario establecer el tamaño de partícula y la distribución de velocidad para la erosión de los materiales de los álabes de la turbina caliente. Por ejemplo, una pequeña reducción en el tamaño de los desechos ferríticos, podría dar como resultado un desgaste erosivo muy reducido, particularmente si la energía cinética de las partículas se pudiera llevar por debajo del nivel crítico sugerido por este modelo.

Para que se produzca el fallo por erosión por partículas sólidas como se ve en la Figura 2.2, se requieren las condiciones siguientes:

1. Crecimiento de los óxidos hasta un espesor crítico.
2. Fallas de la integridad de los óxidos, que provoca delaminación y exfoliación.
3. Las exfoliaciones (escamas) adquieren una energía cinética capaz de provocar la erosión.
4. Las propiedades mecánicas de la superficie son menores que la acción de las partículas exfoliadas.



Figura 2.2. Álabes erosionados en la etapa de alta presión de la turbina de vapor. (Foto tomada por el autor, durante la actual investigación en el RAMP).

Asumiendo, que las partículas sólidas de óxido, con masa  $m$  viajan a la misma velocidad  $V$ , que el vapor y conociendo la relación de la velocidad del fluido con el área de la sección transversal  $S$  de

la tubería de transporte de vapor, y el flujo establecido para una presión dada, se puede sustituir la velocidad  $V$ , por la relación  $F_v/S$ , siendo  $F_v$  el flujo de vapor, entonces:

$$E_c = 1/2 mV^2 = 1/2 \rho d_{ox}^3 \left(\frac{F_v}{S}\right)^2 \quad (2.1)$$

La resistencia de la superficie a la erosión (Reshetnyak, H. 1995), (Wright, I. y Dooley, R., 2011) se puede evaluar asumiendo que una partícula rígida de masa  $m$ , y velocidad  $V$  causa una entalla de ancho  $2b$  (Figura 2.3), entonces el trabajo realizado  $dW$  al agrandar la entalla de  $2b$  a  $2(b + db)$  es (2.2):

$$dw = 4b^2 dz \sigma_y \quad (2.2)$$

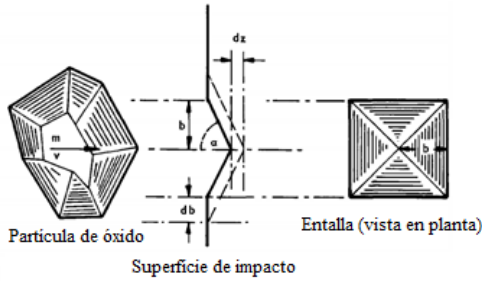


Figura 2.3. Modelo simple para la erosión por entalla (Reshetnyak, H. 1995).

Donde  $dz$  es el aumento de profundidad, como se muestra en la Figura 2.3, y  $\sigma_y$  es el límite elástico en la superficie, por lo que se puede escribir (2.3).

$$dw = \frac{4b^2 db \sigma_y}{\tan \theta} \quad (2.3)$$

Integrando para calcular el trabajo total, realizado en la deformación plástica obtenemos:

$$W = \frac{4b^3 \sigma_y}{\tan \theta} \quad (2.4)$$

El trabajo realizado en la formación de la entalla proviene de la energía cinética absorbida en la superficie. Varios autores asumen que, se absorbe una fracción  $f$ , entonces se obtiene (2.5)

$$\frac{4\sigma_y b^3}{\tan \theta} = f \frac{1}{2} mV^2 \quad (2.5)$$

Esto tiene una forma similar a las expresiones propuestas por Vojnovich (T. Vojnovich et al. 1977), tanto teórica como experimentalmente. En particular, se han deducido valores de  $f \approx 0.001$

para la erosión de los refractarios. Con esta suposición y tomando  $\theta$  como  $68^\circ$  (para un penetrador Vickers) y  $b \approx 14 \mu\text{m}$  ( $b = ic/ 2 \sqrt{2}$ ) como el tamaño crítico de entalla para el astillado de la magnetita y la erosión del metal, se obtiene (2.6):

$$\sigma_y = \frac{f \tan \theta}{8b^3} mV^2 = \frac{2.5 \times 10^{-3}}{21952} mV^2 = 1.14 \times 10^{-7} mV^2 \quad (2.6)$$

Sustituyendo en la ecuación (2.6) la expresión (2.1), se obtiene (2.7):

$$\sigma_y = 1.14 \times 10^{-7} \rho_{ox} d_{ox}^3 \left( \frac{F_v}{S} \right)^2 \quad (2.7)$$

Ahora se debe encontrar el espesor  $d_{ox}$  de las escamas, para obtener la expresión final. La densidad de los restos de óxido es  $\rho_{ox} \approx 5000 \text{ kgm}^{-3}$ , de modo que la velocidad mínima para la erosión por partículas de  $d_{ox} = 0.1 \text{ mm}$  es  $V \approx 300 \text{ ms}^{-1}$ , para partículas de  $d_{ox} = 0.5 \text{ mm}$ , se obtiene  $V \approx 30 \text{ ms}^{-1}$  y para partículas de  $d_{ox} = 1 \text{ mm}$   $V \approx 10 \text{ ms}^{-1}$ .

Para calcular el espesor del óxido ( $d_{ox}$ ), después de un tiempo determinado ( $t \leq 30\,000$  horas), se utiliza la relación de oxidación parabólica (2.8) según Sabau, (Sabau, 2014):

$$d_{ox}^2 = 2k_p \Delta t \quad (2.8)$$

$$k_p(T) = A e^{-E_{ox}/RT} \quad (2.9)$$

Donde A es la constante de Arrhenius,  $E_{ox}$  es la energía de activación del proceso; R es la constante de gas universal; T es la temperatura de crecimiento de óxido,  $k_p$  es la constante de equilibrio, y  $\Delta t$  es el tiempo. Para tiempos mayores que 30 000 horas, se utiliza una expresión lineal y el correspondiente valor de A.

También se puede calcular  $d_{ox}$  mediante la expresión (2.10)

$$d_{ox}^2 = 2\alpha^3 P_T^2 \Delta t \quad (2.10)$$

Donde  $\alpha$  es el grado de disociación del agua y  $P_T$  es la presión total del vapor. Sin embargo, en la presente investigación se utiliza la expresión (2.8).

$$\sigma_y = 1.14 \rho_{ox} (2k_p \Delta t)^{3/2} \left( \frac{F_v}{S} \right)^2 \times 10^{-7} \quad (2.11)$$

$$\sigma_y = 1.14\rho_{ox} \left( 2A\Delta t e^{-E_{ox}/RT} \right)^{3/2} \left( \frac{F_v}{S} \right)^2 \times 10^{-7} \quad (2.12)$$

La expresión (2.12) puede ser utilizada para calcular la probabilidad de que una partícula sólida de masa  $m$  y velocidad  $V$ , erosione la superficie del álabe con una resistencia  $\sigma_y$ . Para el seguimiento durante la operación futura, se puede recordar que  $\sigma_y = H_v/3$ .

Para la solución del problema se elaboró una hoja de cálculo en Excel y se encontraron las distribuciones de la carga y la resistencia para la erosión por partículas sólidas. Para determinar el valor de la densidad del vapor  $\rho$  a 1 atmósfera, se tomaron los datos del anexo A.4 de Incropera (Incropera, 2000) y para el rango de temperaturas de 426,59 °C hasta 545,92°C (699,59 °K hasta 818,92 °K) con rango de presión desde 92,67 bar hasta 165,83 bar (926,7 MPa hasta 1658,3 MPa) se encontró la expresión para la interpolación lineal:

$$\rho = 0,5299 - 0,00032(T + 273) \quad (2.13)$$

Posteriormente se encontraron los valores de  $\rho$  para la presión correspondiente, según la base de datos:

$$\rho_{tr} = \rho \frac{P_{tr}}{1.013} \quad (2.14)$$

$$F_v[m^3/s] = F_v[t/h]/(3.6 \times \rho_{TR} \times 10^3) \quad (2.15)$$

$$V = \frac{F_v[m^3/s]}{0.302} = \frac{F_v[t/h]/(3.6 \times (0.5299 - 0.00032[T+273]) \frac{P_{tr}}{1.013} \times 10^3)}{0.302} \quad (2.16)$$

$$V = \frac{F_v[t/h]}{(11.9205 \times (0.5299 - 0.00032[T+273]) \frac{P_{tr}}{1.013} \times 10^3)} \quad (2.17)$$

$$\sigma_y = 0.57 \times 10^3 \times \left( 3.732 \times 10^{25} \times e^{-39209.1/(T+273)} \right)^{3/2} \times (V)^2 \times 10^{-7} \quad (2.18)$$

$$\sigma_y = \left( 2.12724 \times e^{-39209.1/(T+273)} \right)^{3/2} \times (F_v[t/h]/(11.7675 \times (0.5299 - 0.00032[T + 273]) \times P_{TR}))^2 \times 10^{15} \quad (2.19)$$

De esta forma se ha obtenido una expresión, que relaciona las propiedades mecánicas del metal de los álabes con los parámetros de la operación (temperatura, presión y flujo), que condicionan la ocurrencia del fallo de erosión por partículas sólidas.

### 2.2.2 Estudio de la física del fallo por erosión por gotas de agua

La etapa de alta presión es de particular interés por contribuir al 90% del trabajo total generado en una turbina de vapor de gran tamaño, la etapa de baja presión es igualmente crítica, no sólo porque el área de salida es la principal fuente de pérdidas de energía (y por lo tanto se relaciona con la eficiencia de la turbina), sino porque está fuertemente vinculada a la integridad termodinámica de la máquina.

Mientras el vapor se expande a lo largo de las últimas etapas del recorrido por el rotor de baja presión (LPR), se humedece y las gotas de agua pueden causar significativa erosión del álabe. La erosión por gota de agua (WDE) es una forma esperada de daño en la turbina, que se permite hasta cierto punto para proporcionar la máxima energía disponible con los parámetros de vapor principal y de recalentamiento tomados. Para las turbinas de vapor modernas, con sus últimos pasos largos, la humedad final máxima permitida para el proceso de expansión de vapor no suele exceder del 10 %, aunque para las turbinas de vapor con últimos pasos más cortos se permiten algunos grados de humedad más altos (hasta 12-13 %). Es comprensible que la mayor humedad del vapor se produzca en los últimos pasos, y las turbinas modernas están diseñadas con la máxima protección de los mismos contra WDE. Por lo tanto, la penúltima etapa u otras etapas intermedias del LPR, que operan en un ambiente de vapor húmedo pueden sufrir WDE en mayor grado que el último paso, aunque con una humedad de vapor más baja.

Un factor importante para determinar la tasa de erosión en álabes, en las últimas etapas de la turbina de vapor de baja presión, es la cantidad de agua que se deposita en los álabes estacionarios, e incluso en los álabes rotatorios de las etapas previas a las coronas afectadas. Una consecuencia tangible de la presencia de humedad en las turbinas, es la erosión; las otras consecuencias son aquellas que conllevan a las pérdidas de potencia. El vapor húmedo se agrega a las pérdidas de energía que hay en una etapa de la turbina, pero de manera más remarcada, las pequeñas gotas de agua que se forman en la etapa de baja presión pueden impactar la superficie del álabe a una velocidad y frecuencia elevadas, ocasionando erosión por gotas de agua y afectando el funcionamiento del sistema. En las penúltimas etapas de una turbina de vapor, la condición de trabajo del vapor se acerca al punto de cambio de fase, por lo tanto, las gotas de agua se producen cuando la caída de entalpía del vapor favorece termodinámicamente este proceso, como se describe a continuación (Leyzerovich, 2008):



En las últimas etapas de las turbinas de vapor, el fluido se expande hasta cruzar la línea de saturación, y una parte de él se condensa para formar gotas primarias, cuyos tamaños son comúnmente 0.2 a 2.0  $\mu\text{m}$ . Una fracción de estas gotas primarias se depositan sobre la superficie de los álabes guías que se encuentran estacionarios y sobre los cuales pueden formar pequeñas corrientes de agua o películas de líquido. Estas estructuras aumentan de tamaño, se mueven sobre la superficie del álabe hacia el borde de salida, se vuelven inestables debido a las fuerzas aerodinámicas y finalmente se atomizan, convirtiéndose en gotas secundarias de mayor tamaño, de más de 1500  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Estas gotas atomizadas viajan en las estelas que se forman en el borde de salida de los álabes estacionarios (ver Figura 2,4). Eventualmente entran a una región de alta velocidad del vapor donde se fragmentan en gotas de menor tamaño (pero mayor a las que forman la neblina), llamadas gotas grandes, de 100  $\mu\text{m}$  de diámetro. Éstas se aceleran gradualmente con el vapor y finalmente golpean los álabes en rotación. El resultado es la erosión y el daño a la estructura del material del álabe. Algunas de estas gotas impactarán la superficie del álabe, y los puntos más favorables para localizar el impacto incluyen los bordes de entrada y salida del arco interior y exterior; el resto de las gotas pasan a través del canal de álabes y salen del sistema.

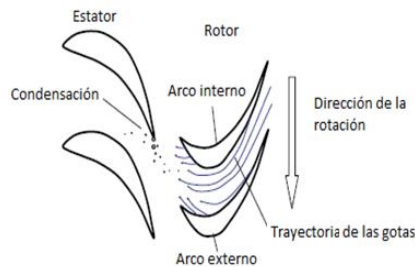


Figura 2.4. Formación de gotas secundarias (Leyzerovich, 2008).

En general, la erosión se caracteriza frecuentemente por las curvas de erosión, que muestran la tasa de erosión como función del tiempo. Los fabricantes de turbinas se interesan en la integral de esta curva, es decir, el área bajo la curva de erosión para evitar que la pérdida de material exceda un valor crítico, que afecte el tiempo de vida del componente.

Además, utilizan una cantidad de energía, que se deriva de la energía cinética: la energía de impacto,  $E_i$ . Ésta se define como la energía mínima requerida para la formación de un cráter y es equivalente a la energía cinética por unidad de área. Esta energía varía de acuerdo a la velocidad de impacto  $V_i$ .

La evolución de la energía de impacto con respecto al tiempo, permite identificar un radio en el cual no existen cráteres, (ver Figura 2.5), y comparar la resistencia de diferentes materiales, por ejemplo, el titanio requiere una energía de impacto mayor que la de los aceros.

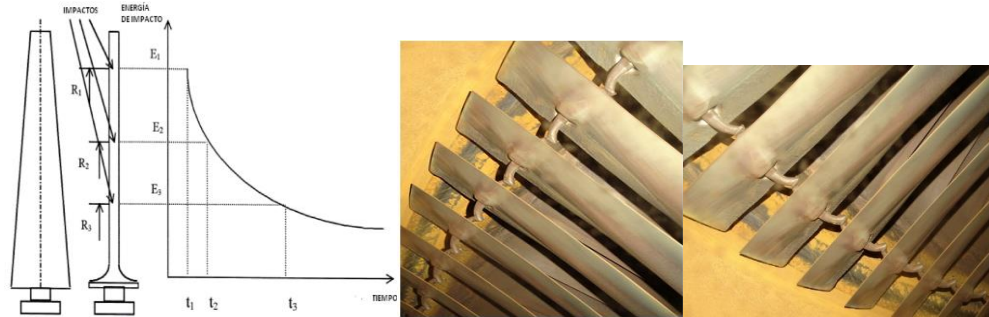


Figura 2.5 Erosión de los álabes en dependencia de su radio. (Fotos tomadas por el autor 2023)

Para evaluar el riesgo de erosión por gotas de agua, Hitachi utiliza con éxito, la fórmula empírica (2.20), a través del criterio de evaluación  $E$  (Leyzerovich, 2008):

$$E = 4.3(0.01U_p - 2.44)^2 y_1^{0.8} \quad (2.20)$$

Donde  $U_p$  es la velocidad circunferencial de los álabes en m/s,  $y_1$  es la humedad del vapor.

$$E = 4.3 \left( 0.01 \frac{2\pi r p m}{60} r - 2.44 \right)^2 y_1^{0.8} \quad (2.21)$$

$$E = 4.3 \times (3.77 \times r - 2.44)^2 \times y_1^{0.8} \quad (2.22)$$

Para el análisis del riesgo de fallo por erosión por gotas de agua se evalúa (2.22) para 2 casos extremos, para el largo de los álabes de 0.5 y de 1.5 metros, mientras que la humedad del vapor se toma entre 8 y 12 %.

$$\text{Para } r = 0.5 \text{ m} \quad E = 1.33 \times y_1^{0.8} \quad (2.23)$$

$$\text{Para } r = 1.5 \text{ m} \quad E = 44.46 \times y_1^{0.8} \quad (2.24)$$

### 2.2.3 Estudio de la física del fallo por choque térmico.

La entrada de vapor con temperatura diferente a la del metal, induce un choque térmico. Cuando el agua ingresa a una turbina que está girando a elevada velocidad, puede causar daños mecánicos significativos para los álabes, toberas y cojinetes de empuje. Cuando esto sucede durante el

funcionamiento, aumentan las vibraciones de los álabes fijos y rotatorios y crece el riesgo de que fallen estos componentes, en las zonas por donde se está introduciendo el agua o vapor frío.

El problema del estrés térmico es de gran importancia en las turbinas de alta potencia. La tendencia actual hacia el aumento de las temperaturas, ha requerido el uso de materiales refractarios, capaces de soportar temperaturas mucho más altas, que los materiales de ingeniería normales (Hu, J.S., Wang, B.L, 2020). Una propiedad destacada de estos materiales es la falta de ductilidad. Por esta razón, la resistencia al estrés térmico es uno de los criterios de diseño más importantes en la aplicación de estos materiales. Actualmente, el estrés térmico también recibe una atención considerable en relación con los materiales dúctiles, ya que existe evidencia de que el fallo de muchos componentes dúctiles puede atribuirse al ciclo térmico.

Las fuentes más frecuentes de inducción de agua son las líneas principales de vapor y sus atemperadores. La inducción de agua también puede descender desde los drenajes de las líneas principales de vapor, tuberías cruzadas y las propias cubiertas de los cilindros. A veces, el agua y el vapor frío ingresan a las turbinas a través de los sellos de las glándulas terminales. La mayoría de las veces, todas estas situaciones están asociadas con el arranque y la parada de la turbina, aunque en cualquier caso son causadas por grandes deficiencias de la tecnología de arranque o la violación de las instrucciones de operación.

Del mismo modo, si se produce un reflujó de agua fresca o vapor frío durante el arranque, el rotor de la turbina de vapor se puede distorsionar térmicamente, causar grandes roces en los sellos y álabes y quedar severamente dañados. Si la inducción del agua o vapor frío se produce durante una parada, después que se ha abierto el interruptor del circuito eléctrico, ocurre la sobrevelocidad de la turbina, que la puede conducir a su destrucción. Si la cantidad de agua es lo suficientemente significativa como para retrasar la rotación de la turbina, conduce a la destrucción de la ruta completa del vapor en la turbina. De lo contrario, la inducción de agua puede causar daños locales y deformaciones que, pueden ser tan graves que los elementos dañados deben reemplazarse, incluso un rotor en su conjunto o el cojinete de empuje.

Los materiales frágiles y dúctiles reaccionan al esfuerzo térmico de manera diferente. Los materiales frágiles pueden soportar sólo una pequeña deformación antes de la ruptura; mientras que los dúctiles pueden soportar una deformación considerable sin romperse.

Cuando un material se somete a un gradiente de temperatura, o cuando se calienta un material compuesto, que consiste en dos o más materiales de diferentes coeficientes de expansión, las diversas fibras tienden a expandirse en diferentes longitudes, de acuerdo con sus temperaturas y con el coeficiente térmico de expansión individual. Para lograr que el cuerpo permanezca íntegro, en lugar de permitir que cada fibra se expanda individualmente, se puede introducir un sistema de tensión térmica y tensiones asociadas, dependiendo de la forma del cuerpo y de la distribución de temperatura. Si el material no puede resistir ni las tensiones ni las deformaciones, entonces se produce la ruptura.

El comportamiento de los materiales ante el esfuerzo térmico, depende esencialmente, de su capacidad de absorber deformaciones inducidas, para mantener el cuerpo íntegro. Tras la aplicación del gradiente térmico, los materiales frágiles no pueden resistir fácilmente las deformaciones superpuestas, sin inducir suficiente tensión, que cause la ruptura; por otro lado, los materiales dúctiles, generalmente pueden soportar estas tensiones adicionales, pero en última instancia pueden fallar si se someten a una serie de ciclos de cambio de temperatura, es decir fallan por fatiga térmica.

El esfuerzo por choque térmico puede distinguirse por el hecho de que las tensiones se producen por gradientes transitorios de temperatura, generalmente repentinos. En cualquier instante, las tensiones están determinadas por la distribución de temperatura y no son diferentes de lo que serían si esta distribución pudiera obtenerse en estado estacionario. Pero los gradientes de temperatura, que pueden establecerse en el estado transitorio son generalmente mucho más altos, que los que ocurren en el estado estacionario, y por lo tanto el choque térmico es importante en relación con el esfuerzo térmico ordinario, debido a la mayor tensión que puede inducirse. Otra distinción entre el esfuerzo térmico y el choque térmico, es que la velocidad de aplicación de la tensión es muy rápida y muchos materiales se ven afectados por la velocidad a la que se aplica la carga. Algunos materiales se fragilizan bajo la aplicación rápida de la tensión y, por lo tanto, es posible que no soporten esa tensión de choque térmico, que podría absorberse fácilmente, si se aplicara de forma lenta. Tanto Manson (Manson, 1953), como Pinca (Pinca, 2008) utilizan los estudios del choque térmico en una placa plana, para encontrar la distribución de temperatura, que puede provocar su fallo. Entonces se evalúa la expresión (2.25)

$$T_{0,max} = 3.25 \frac{\sigma_f}{E\alpha} \frac{1-\mu}{N_u} \quad (2.25)$$

Según Winterton, R. H. S. (Winterton, 1997), Moroz (Moroz, 2017), Goloshumova (Goloshumova, 2016), Incropera (Incropera, 2000), Rezinskix (Rezinskix, 2006), Camaraza (Camaraza, 2022) y Rusin (Rusin, 2021) para el caso del rotor de la turbina, el número de Nusselt se puede encontrar utilizando la ecuación de Dittus-Boelter:

$$N_u = 0.02 Re_Z^{0.8} Pr^{0.33} \quad (2.26)$$

Sustituyendo (2.26) en (2.25) y dejando las propiedades mecánicas en el miembro izquierdo se tiene:

$$\sigma_f = \frac{0.02}{3.25} \frac{E\alpha}{1-\mu} Re_Z^{0.8} Pr^{0.33} T_0 \quad (2.27)$$

$$\sigma_f = 6.2 \frac{E\alpha}{1-\mu} (\rho d V / \vartheta)^{0.8} Pr^{0.33} \times T_0 \times 10^{-3} \quad (2.28)$$

Para el cálculo de las propiedades mecánicas, dependientes de las condiciones de operación, se realiza la interpolación lineal de la densidad y la viscosidad dinámica del vapor, teniendo en cuenta los valores que muestra el anexo A.4 de (Incropera, 2000). Estas expresiones se programaron en la hoja de cálculo de Excel, para lo que se utilizan las expresiones (2.29), (2.30) y (2.31)

$$\rho = 0,5299 - 0,00032(T + 273) \quad (2.29)$$

$$\vartheta = -13,35 + 0,365(T + 273) \quad (2.30)$$

$$V = \frac{F_v[t/h]}{\left(11.9205 \times (0.5299 - 0.00032[T+273]) \frac{P_{TR} \times 10^3}{1.013}\right)} \quad (2.31)$$

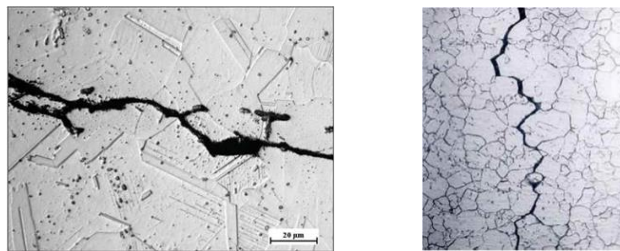
## 2.2.4 Estudio de la física del fallo por agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC)

El agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) es aquel, que es inducido por la influencia combinada de la tensión de tracción y un ambiente corrosivo (Sáenz L.A, 2020). El impacto del SCC en un material generalmente se encuentra entre el agrietamiento en seco y el umbral de fatiga de ese material. Este factor hace que sea común que el SCC no sea evidente antes del fallo.

El SCC progresa rápidamente y es más común entre las aleaciones que entre los metales puros. El entorno específico tiene una importancia crucial, y solo se necesitan concentraciones muy pequeñas de ciertos productos químicos altamente activos, para producir un agrietamiento catastrófico, que conduce a fallas devastadoras e inesperadas. La presencia de tensiones de tracción resulta peligrosa, ya que las tensiones de compresión ejercen una influencia protectora,

especialmente a temperatura elevada en el caso de los metales. El ambiente químico que causa SCC para una aleación determinada es levemente corrosivo para el metal, de forma que, si no existieran tensiones, sólo provocaría leve corrosión. Por lo tanto, las piezas de metal con SCC severo pueden aparecer brillantes y relucientes, mientras presentan grietas microscópicas.

La deformación y el conformado en frío, la soldadura, el tratamiento térmico, el mecanizado y el esmerilado pueden introducir tensiones residuales. La magnitud y la importancia de tales tensiones se subestiman. Las tensiones residuales creadas como resultado de las operaciones de soldadura tienden a aproximarse al límite elástico. La acumulación de productos de corrosión en espacios confinados también puede generar tensiones significativas y no debe pasarse por alto. El SCC generalmente ocurre en ciertas combinaciones específicas de aleación-ambiente-esfuerzo. Macroscópicamente, las fracturas por SCC tienen una apariencia frágil (Figura 2.6). Los datos experimentales de SCC son notorios por una amplia gama de dispersión (Caicedo J., Reyes. 2017).



*Figura 2.6 Grietas en el metal de la turbina debido al fenómeno de SCC. (Sáenz L.A, 2020)*

Muchos investigadores han clasificado todos los fallos por agrietamiento que ocurren en medios corrosivos como agrietamiento por corrosión bajo tensión, incluidas las fallas debidas a la fragilización por hidrógeno. La protección catódica es un método eficaz para prevenir el agrietamiento por corrosión bajo tensión, mientras que acelera rápidamente los efectos de la fragilización por hidrógeno. Durante el agrietamiento por tensión-corrosión, el metal o la aleación prácticamente no son atacados en la mayor parte de su superficie, mientras que las grietas finas progresan a través de él. Este fenómeno de agrietamiento tiene serias consecuencias, ya que puede ocurrir en esfuerzos dentro del rango de esfuerzo de diseño (Figura 2.7) (Imayer V. M. 2020) (Khalifeh A. 2019).

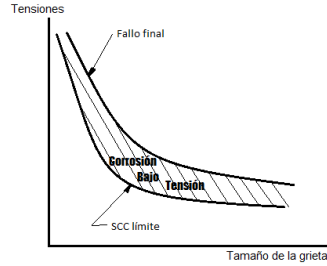


Figura 2.7. Intervalo de ocurrencia del fallo por SCC (Imayer V. M. 2020) (Khalifeh A. 2019)

Cuando aparece una grieta, se puede evaluar la probabilidad de fallo del elemento por corrosión bajo tensión, conociendo la temperatura de trabajo y su límite convencional  $\sigma_{0,2}$ , utilizando una ecuación empírica, obtenida por especialistas de Westinghouse, la cual coincide con investigaciones realizadas por General Electric y otras firmas rusas (Leyzerovich, 2008) (Sandor R. et al., 1982) (Rezinskix, 2005)

$$\ln(\vartheta) = -16.829 - \frac{4057}{T} + 0.04\sigma_{0,2} \quad (2.32)$$

$$\sigma_{0,2} = 420.73 + \frac{1.01 \times 10^5}{T} + 25 \ln(\vartheta) \quad (2.33)$$

Donde  $\vartheta$  es la velocidad de crecimiento de la grieta, T la temperatura de trabajo y  $\sigma_{0,2}$  es el límite de fluencia. La expresión (2.32) coincide con la (2.34), presentada por Rezinskix (Rezinskix, 2005)

$$\log(\Delta h) = b + a\sigma_b + c\delta^{1000} + d\sigma_m \quad (2.34)$$

Tabla 2.1 Valores de los coeficientes para diferentes tiempos

Tiempo	b	a	c	d
1000 h	0,037	$2,09 \times 10^{-3}$	-2,222	0
5000 h	1,403	0	-1,099	$-1,8 \times 10^{-3}$

### 2.2.5 Estudio de la física del fallo por creep

La respuesta inelástica del material es conocida como “fluencia lenta o creep”. Gran parte de los fallos ocurridos a altas temperaturas son atribuidos a fluencia lenta o a una combinación fluencia lenta con la fatiga. (Sáenz, 2018).

La fluencia lenta es caracterizada por un flujo lento del material. Este actúa como si fuese viscoso y puede definirse como la acumulación de deformación plástica con el tiempo. Cuando un componente mecánico está sometido a carga de tracción constante y a temperatura constante, la disminución del área de la sección transversal genera un incremento en el esfuerzo; es decir hay una deformación instantánea, después se observa una deformación plástica continua, creciente con el tiempo (fenómeno de fluencia lenta) y puede llegar a ruptura en un tiempo determinado.

Una curva de fluencia lenta o creep es la representación gráfica del alargamiento de una probeta de tracción a una carga constante y medir la deformación (elongación) en función del tiempo, a una temperatura determinada y bajo condiciones constantes o esfuerzo real, obteniéndose un cambio dinámico del comportamiento del material, el cual es representado en la Figura 2.8. (Imayer V. M. 2020.)

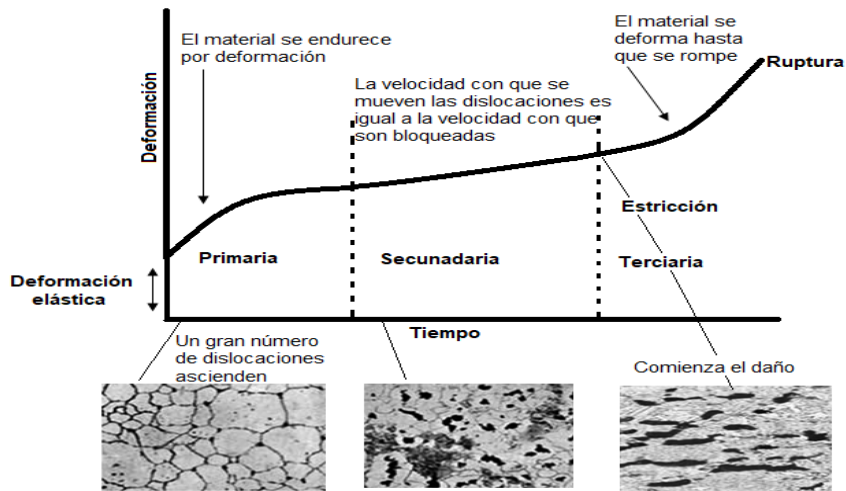


Figura 2.8. Curva de creep con metalografía relativa a cada etapa. (Imayer V. M. 2020) (Sáenz, 2018)  
(ASM Handbook, 1992)

Es importante resaltar que el fenómeno de fluencia lenta se torna importante en ingeniería, cuando la temperatura es elevada o el esfuerzo aplicado es grande. La etapa de creep secundario es la más importante ya que representa la mayor parte de la deformación de fluencia lenta resultante del uso



de componentes sometidos a esfuerzos a altas temperaturas, por ejemplo, turbinas y reactores nucleares. Esta etapa se caracteriza por una pronunciada velocidad de deformación, debido a:

- Apilamiento de dislocaciones por carburos de tamaños submicroscópicos
- El calor induce al crecimiento de los carburos, resultando la pérdida de influencia de las dislocaciones y por lo tanto sobre la resistencia a fluencia lenta.
- Formación de nuevos submicroscópicos carburos por apilamiento de dislocaciones
- Decrecimiento en la matriz del contenido de carburos, formando elementos metaestables.
- Este proceso continúa hasta que los carburos disueltos inestables se transforman en carburos estables.
- El apilamiento de dislocaciones está en continuo decrecimiento y la velocidad de fluencia lenta se incrementa simultáneamente. Esta relación indica la transición a la tercera etapa.

El régimen de temperatura en el que la fluencia lenta se torna importante está definido por:

$$0.5T_f < T < T_f \quad (2.35)$$

Donde:

$T_f$  = Temperatura de fusión del material (en Kelvin).

T = Temperatura de trabajo.

Este rango establece la región de temperatura en la que la difusión se torna un factor significativo. Siendo la difusión un proceso térmicamente activado y presenta una dependencia exponencial con la temperatura.

Para temperaturas menores que  $0.5T_f$  el coeficiente de difusión, es tan bajo que cualquier mecanismo de deformación dependiente de la difusión es tan lento que puede ser despreciable.

En fluencia lenta la correlación entre propiedades y comportamiento de un material es muy crítica, debido a que en las aplicaciones se quiere conocer ese comportamiento bajo un extenso período, mientras que las propiedades sólo se conocen bajo un cierto período. Algunas veces, se encuentran situaciones en las que se hace necesario un análisis aproximado de fluencia lenta, pero los datos para el material y la temperatura no están disponibles.

De aquí que, han sido desarrollados algunos métodos de extrapolación, buscando predecir el comportamiento de aleaciones en ensayos llevados a cabo en un corto período de tiempo. Una de las formas de hacer un estimado es usando datos de ruptura, relacionándolos con datos de fluencia lenta.

Existen un gran número de métodos para determinar el comportamiento de fluencia lenta, basados en el concepto de que el tiempo que emplea una deformación dada se puede “cambiar” por temperatura. Se han propuesto diversas relaciones por distintas investigaciones, y en todos los casos el grado de éxito se mide por cuán cerca caen todos los puntos sobre una “curva patrón”, cuando el esfuerzo es graficado con la función seleccionada de temperatura y tiempo.

Larson y Miller (1952), propusieron un método que correlaciona la temperatura,  $T$  con el tiempo de ruptura,  $t_r$  a un esfuerzo constante  $\sigma_r$ , la ecuación es de la forma siguiente:

$$LMP = T (C + \log t_r)$$

El valor de  $C$  puede ser determinado para un material dado de un gráfico como el de la Figura 2.9. Para diferentes aleaciones ferrosas a alta temperatura, se ha encontrado que  $C$  oscila entre 15 y 30. Dado que  $m$  es función de la tensión, se puede escribir:  $T (\log t_r + C) = m$  ó  $P_1 = f_1(\sigma)$ .

donde  $P_1 = T (\log t + C)$  es el parámetro de Larson-Miller y  $m = f_1(\sigma) = M E a/k$ .

De este modo si  $P_1$  es evaluado para una variedad de pares de valores de  $t_r$  y  $T$  y se grafica versus la correspondiente tensión observada, resulta una curva única para un material dado. Aquí  $C$  es obtenido de la Figura 2.9 por prolongación de las rectas hasta el eje  $\log t$  y usando los promedios de intersección.

El parámetro  $P_1$  tiene igual valor para una infinita combinación de  $t$  y  $T$ , recorriendo desde el corto tiempo y altas temperaturas, que representan las condiciones de ensayo, hasta los largos tiempos y bajas temperaturas que representan las condiciones de servicio. La parte de la curva master construida a partir de los resultados de ensayo puede ser utilizada para obtener la tensión de diseño para largos tiempos de servicio. Un único valor promedio de  $C$  es frecuentemente usado para diferentes aleaciones para altas temperaturas. Este procedimiento hace posible el uso de la misma escala para  $P_1$ , para todas las curvas master, de este modo pueden ser dibujadas en un mismo gráfico. Si el valor real de  $C$  para cada aleación está cerca de este valor promedio, este procedimiento puede ser justificado por la pequeña cantidad de trabajo involucrado y la

comparación directa posible entre aleaciones. El valor promedio comúnmente usado es  $C = 20$ . Se ha demostrado sin embargo que resultados apreciablemente más precisos se obtienen cuando se utiliza el valor correcto de  $C$  para cada material.

La constante  $C$  se puede determinar graficando  $1/T$  vs  $\text{Log } t_r$ , para un esfuerzo constante, tal como podemos se puede observar en la Figura 2.9, las líneas convergen a  $1/T = 0$  y  $\text{Log } t_r = -C$

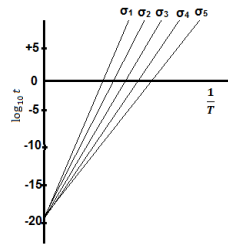


Figura 2.9 Familia de curvas para diferentes valores de  $\sigma$  (Solano R. 1982) (Saenz L. 2020)

Para la evaluación del riesgo de daño por fluencia (creep), es de uso general, el parámetro de Larson Miller y la evaluación de las tensiones correspondientes que provocan fallo por fluencia (Moroz, 2017) (Solano R. 1982) (Saenz L. 2020)

$$LMP = T((\log t_r) + a_1) \quad (2.36)$$

Se han llevado a cabo investigaciones para encontrar relaciones lineales entre el parámetro de Larson Miller y las tensiones de creep (Figura 2.10). En la presente investigación se tomaron las relaciones expuestas por Mendelson (Mendelson A, Ernest Roberts, and Munson S.S. 1965) y se obtuvieron las expresiones (2.37) y (2.38) siguientes:

$$\sigma = 1652,36 - 59,23LMP \quad (2.37)$$

$$\sigma = 1652,36 - 59,23(20 + \log t_r)T \quad (2.38)$$

$$\sigma_c = 0,142\rho r^2 = 1,15r^2 \quad (2.39)$$

Para evaluar la probabilidad de riesgo de daño por creep para la turbina de vapor, se toma  $a_1$  igual a 20,  $a_2$  igual a cero, mientras que  $a_3$  igual a 1000. Siendo  $t_r$  el tiempo hasta la ruptura de 30 000 horas y  $T$  la temperatura de trabajo.

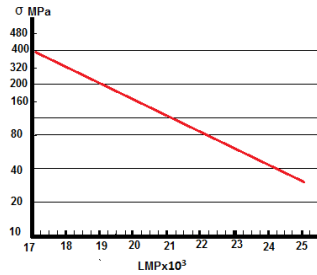


Figura 2.10. Relación del LMP con las tensiones. (Solano R. 1982) (Sáenz, 2018) (Moroz L. 2017)

### 2.2.6 Estudio de la física del fallo por fatiga térmica

La resistencia a la fatiga se define como el valor máximo de esfuerzo alternante (cíclicos) que resistirá el material sin fallar, para un número dado de ciclos. Para obtener medidas cuantitativas de resistencia a la fatiga, es necesario realizar los ensayos bajo condiciones controladas, para ello han sido diseñadas una gran variedad de máquinas y normas de ensayo. Para el daño por fatiga térmica se utilizan las ecuaciones del choque térmico, así como las curvas S-N, esfuerzos (deformación)- número de ciclos (Figura 2.11).

La falla por fatiga de los metales ocurre por carga aplicada en formas variables o repetidas que dan como resultado una fractura frágil sin deformación plástica notable (Sáenz L.A, 2020) (Moroz L.2017). Generalmente las grietas por fatiga se originan en alguna discontinuidad superficial como hendiduras o cambios de sección lo que origina concentraciones de esfuerzos.

Para que se produzca una rotura por fatiga son necesarias tres condiciones:

1. Carga aplicada a magnitud elevada.
2. Una variación o fluctuación suficientemente intensa de carga.
3. Un número suficiente de ciclos o inversiones de carga.

Sin embargo, la carga por fatiga está condicionada a otros factores tales como:

- a. Tamaño de la pieza
- b. Concentradores locales de esfuerzos
- c. Tipo y forma de las cargas
- d. Corrosión

- e. Temperatura
- f. Microestructura del material
- g. Tensiones residuales
- h. Inclusiones
- i. Acabado superficial.

Todos estos factores van a determinar la resistencia a la fatiga del material.

El comportamiento a fatiga de los materiales se puede representar con bastante aproximación como una recta en representación logarítmica, llegando a una tensión por debajo de la cual no se produce fallo por fatiga, siendo éste el ya nombrado límite de fatiga ( $\sigma'_n$ ).

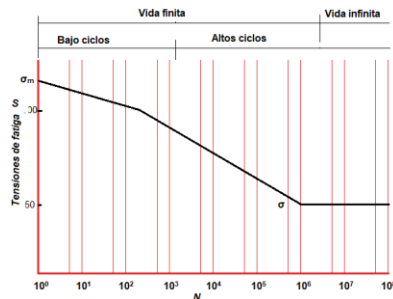


Figura 2.11 Curva S-N de fatiga térmica (Sáenz L.A, 2020)

El límite de fatiga real de una pieza puede ser muy diferente al obtenido según el diagrama S-N. Esto es así porque todo diagrama S-N ha sido obtenido experimentalmente a partir de ensayos en una probeta concreta, con una determinada geometría, con un determinado acabado superficial, bajo la acción de unas condiciones de carga, temperatura de ensayo, etc., que en general, resultarán muy diferentes a las condiciones reales de trabajo a las que estará sometida la pieza.

En este sentido, y para tener en cuenta los distintos factores que van a influir en el valor real del límite de fatiga, se va a modificar el diagrama de la curva S-N (Figura 2.12). En este proceso, se va a mantener constante el punto de partida de la curva para una vida  $10^3$  ciclos, y se va a modificar el punto para  $10^6$  ciclos de vida correspondiente al límite de fatiga ( $\sigma'_n$ ), de acuerdo a ciertos factores que tengan en cuenta las condiciones reales de trabajo.

El nuevo límite a fatiga ( $\sigma_n$ ) se calcula en el Anexo 5 a partir del teórico anterior obtenido de los ensayos ( $\sigma'_n$ ), pero afectado de los distintos coeficientes correctores que recojan la influencia de los distintos factores de acuerdo a las condiciones reales de trabajo:

$$\sigma_n = C_a \cdot C_b \cdot C_c \cdot C_d \cdot C_e \cdot \sigma'_n = 190 \text{ MPa} \quad (2.40)$$

donde,

$\sigma_n$  = límite de fatiga real ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$\sigma'_n$  = límite de fatiga teórico de la probeta de ensayo

$C_a$  = coeficiente por acabado superficial

$C_b$  = coeficiente por tamaño

$C_c$  = coeficiente de confianza

$C_d$  = coeficiente de temperatura

$C_e$  = coeficiente de sensibilidad a la entalla

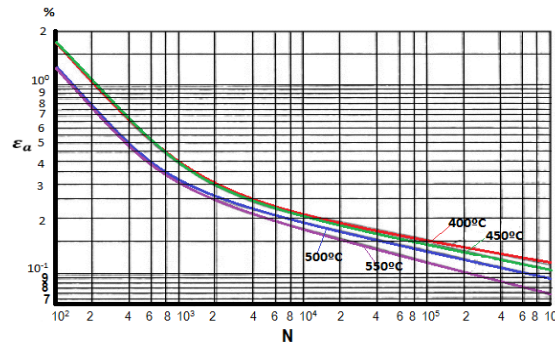


Figura 2.12. Curvas de fatiga para diferentes temperaturas. (Goloshumova, V. 2016) (Moroz L. 2017)

Para determinar la carga a la que están sometidos los componentes de la turbina para el fallo por fatiga térmica, se utiliza la expresión:

$$\sigma = \pm \frac{E\alpha\Delta T}{1-\mu} \quad (2.41)$$

Teniendo en consideración todo lo anterior se obtiene la expresión para determinar la resistencia a la fatiga térmica.

$$\sigma_r = 434,2 \frac{620}{460+T_{\circ F}} = \frac{269204}{460+(1,8*T_{\circ C}+32)} \quad (2.42)$$

### 2.2.7 Evaluación de probabilidad de fallo por vibraciones

Según Palomino E., no hay dudas de que las vibraciones constituyen el mejor indicador de estado de la maquinaria industrial, sin dejar a un lado la utilización de otras técnicas tales como: la termografía, la tribología, la evaluación de los parámetros de proceso, la inspección visual y cualquier otra técnica no destructiva encaminada a conformar un criterio preciso sobre la condición de operación de la máquina. El modo más “sencillo” de aplicar las Tecnologías Predictivas empleando las vibraciones como parámetro de diagnóstico, consiste en la medición de niveles totales de vibraciones a intervalos periódicos, en aquellos puntos que constituyen los que mejor revelan el comportamiento dinámico de la máquina. El modo más complejo de aplicación de las tecnologías predictivas, se basa en el monitoreo continuo de vibraciones y parámetros de proceso en máquinas críticas, tal es el caso de un turbo –generador. (Palomino E, 2012)

Las vibraciones constituyen una consecuencia del comportamiento dinámico del sistema rotor-cojinetes. Aquellas condiciones cuyo origen radica en inestabilidad, desbalance, desalineamiento, soldadura, desgaste y en algunos casos tensiones en componentes, exhiben características propias de las vibraciones. (Palomino E., 2003)

Cada máquina rotativa presenta una vibración característica que la diferencia de forma única, y se conoce comúnmente como firma de vibración. Esta señal está totalmente condicionada por su diseño, fabricación, uso y desgaste de cada uno de sus componentes (White G, 2015). De las distintas tecnologías aplicables al mantenimiento predictivo, el análisis de vibraciones es la más popular. La razón radica en la posibilidad de determinar una gran cantidad de defectos, en una amplia gama de máquinas con una inversión económica inicial razonable. La vibración es uno de los indicativos más claros del estado de una máquina. Bajos niveles de vibración indican equipo en buen estado, cuando estos niveles se elevan está claro que algo comienza a ir mal (Tranter J, 2022). Los equipos utilizados para la adquisición de datos de vibraciones en las máquinas van desde los portátiles o de campo hasta la monitorización en continuo u "on-line". El control de los parámetros de proceso (presión, temperatura, caudal, etc.) de los equipos ha sido objeto de automatización desde hace más de una década en base a sistemas de control distribuido y redes de autómatas programables con interfaces Scada. El control de los parámetros de mantenimiento (vibración,

temperatura, etc.) de los mismos equipos tiene todavía un largo camino por recorrer antes de lograr una implantación generalizada y una integración dentro del proceso de planta.

Algunos de los problemas que se pueden detectar con el análisis de vibraciones: Desequilibrios, desalineaciones, holguras, aflojamientos, problemas de lubricación en cojinetes, daños en rodamientos, en engranajes, en motores eléctricos, problemas hidráulicos, entre otros. Además, un gráfico de tendencias de vibraciones en un nivel global o bien en un rango de frecuencias dado, que es una herramienta de un valor muy alto para el control de nuestros equipos. Por último, se señala la importancia de la creación de los niveles de alerta y de alarma para optimizar los análisis. (Paloino E, 2012)

Para la medición y análisis de las vibraciones en la actualidad se utilizan equipos y sistemas como los siguientes:

- Medidores de valores globales.
- Colectores de datos.
- Analizadores de vibraciones.
- Monitorización en continuo (on-line).

El seguimiento, monitoreo, análisis y diagnóstico por vibraciones de la turbina de la CTE A. Guiteras se lleva a cabo con un sistema de sensores, como el presentado en la Figura 2.13.

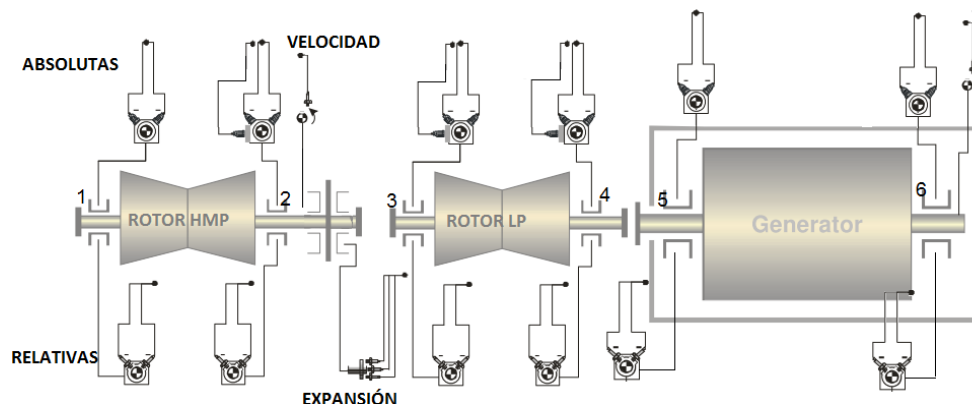


Figura 2.13. Esquema de montaje de los sensores para el monitoreo de vibraciones en el turbo grupo de la CTE A. Guiteras, de Matanzas (Elaboración propia del autor)



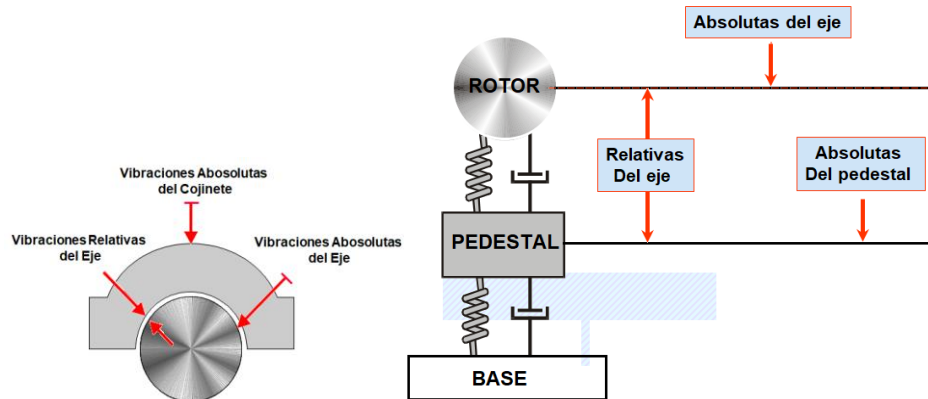


Figura 2.14. Esquema de medición de vibraciones relativas y absolutas (Elaboración propia del autor)

La valoración de la severidad de las vibraciones absolutas, se realiza por la norma ISO 10816, la cual brinda los rangos para cada tipo de máquina, y se recomienda el valor RMS del nivel total de la velocidad de las vibraciones. En particular para turbinas de vapor, por encima de 50 MW, se consideran los límites entre las zonas de severidad:

- ✓ A/B: 3.5 mm/s rms de la velocidad
- ✓ B/C: 7.1 mm/s rms
- ✓ C/D: 11.0 mm/s rms

Para el caso de las vibraciones relativas, se toma el valor pico a pico del desplazamiento, en micrones.

- ✓ A/B: 75  $\mu$  p-p
- ✓ B/C: 150  $\mu$  p-p
- ✓ C/D: 240  $\mu$  p-p

Las Norma ISO 10816 y la ISO 7919, establecen las siguientes zonas de severidad (ISO 7919, 2006) (ISO 10816, 2004)

Zona A: Las máquinas de nueva instalación deben presentar vibraciones dentro del rango de esta zona.

Zona B: Las máquinas que exhiben vibraciones dentro de esta zona, se consideran aceptables para la operación prolongada sin límites.

Zona C: Las máquinas con vibraciones dentro de este rango se consideran inaceptables para la operación prolongada. Se permite la operación de las máquinas con vibraciones en esta zona por un periodo limitado hasta la próxima parada para mantenimiento.

Zona D: Las vibraciones en este rango se consideran de una severidad suficiente como para causar daños irreversibles a la máquina, por lo que debe ser sacada de servicio de inmediato.

Los valores establecidos por las normas para las vibraciones absolutas, como para las relativas, sirven para modelar la resistencia de las máquinas para este tipo de mecanismo de fallo, por lo que su distribución de probabilidades, representa la distribución de la resistencia. Mientras tanto, los valores reales medidos de forma periódica, permiten determinar la distribución de las probabilidades de la carga.

Se ha diseñado una base de datos con la configuración adecuada de cada parámetro, lo que garantiza la correcta recolección de los datos. Para el monitoreo continuo de las vibraciones relativas y absolutas, en la CTE A. Guiteras se utiliza el sistema Vibrocontrol 4000 de la firma Schenk, pero no cuenta con el módulo de almacenamiento de datos, por lo que se utiliza el colector de datos VibXpert II con el software OMNITREND, de la firma Pruftechnik. Estas bases de datos, fueron utilizadas para realizar la evaluación de la confiabilidad durante la presente investigación.

### **2.2.8 Influencia de la calidad del mantenimiento en la resistencia**

Los indicadores de resistencia de los elementos se seleccionan teniendo en cuenta todos los factores que de una forma u otra inciden en que dicho elemento resista determinadas condiciones de operación. Resulta evidente, que en este aspecto se deben tener en cuenta indicadores de diseño, fabricación, montaje, operación y mantenimiento. Para el cálculo de la confiabilidad durante la operación y mantenimiento de un activo determinado, los indicadores de diseño y fabricación no tienen carácter probabilístico, sino que tienen valores determinísticos, ya que estas etapas del ciclo de vida del activo, ya han tenido lugar y no cambiarán. Estos indicadores pueden ser calculados, siguiendo la metodología de Weibull para el cálculo de confiabilidad, basado en el historial de fallos. Así, el carácter probabilístico será inherente sólo a la etapa de operación y mantenimiento, que pueden incluir reparaciones y montajes. La resistencia estará modelada por los parámetros que caracterizan la calidad de las acciones de mantenimiento.

Todas las acciones de mantenimiento son actividades, que se realizan en serie (Figura 2.13), por lo que la resistencia del activo se puede modelar por la resistencia en serie que aporta cada actividad.

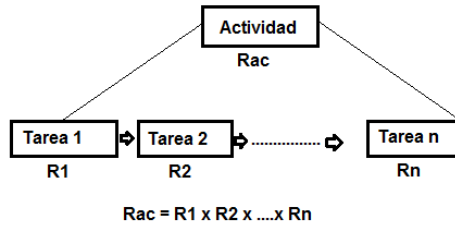


Figura 2.15. Modelación de la reparación del activo. Ejecución de tareas en serie  
(Lifetime Reliability. 2021)

La resistencia que presenta un elemento ante determinado fallo depende de la calidad con que se realizan las acciones de mantenimiento.

El gráfico del por ciento de vida útil de un activo determinado, según haya sido la calidad de las acciones del mantenimiento se muestra en la Figura 2.14. En la zona 1 los trabajos se han realizado incumpliendo las exigencias de las normas, por lo que las expectativas de supervivencia son muy bajas. En la zona 2, las acciones de mantenimiento se han realizado cumpliendo el mínimo de las exigencias, es la llamada zona de tolerancia o aceptable, que todavía no garantiza un elevado por ciento de uso de la vida útil del elemento. La zona 3, se caracteriza por trabajos realizados con elevada calidad, aplicando los conceptos proactivos, por lo que se puede esperar que el elemento trabaje satisfactoriamente durante el 100% de la vida útil diseñada.

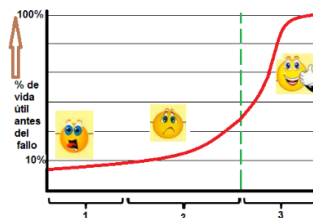


Figura 2.16. Relación entre la vida útil y la calidad de la reparación. (Lifetime Reliability. 2021)

Algunos autores han estudiado la dispersión de los indicadores de calidad de las acciones de mantenimiento, que se obtiene, dependiendo del método y las herramientas utilizadas. Al determinar los parámetros estadísticos de dichas dispersiones, se puede calcular la probabilidad de obtener estructuras resistentes a los diferentes mecanismos de degradación. Estos indicadores

pueden ser utilizados para caracterizar la “Resistencia” del activo ante los diferentes mecanismos de degradación.

La figura 2.15 muestra el resultado de dos ejemplos del mencionado estudio. Tanto durante el apriete de los tornillos de anclaje de un pedestal, como durante el alineamiento de ejes de una máquina rotatoria, se pueden obtener diferentes resultados, dependiendo del método y las herramientas empleadas. Lo cual significa, que la estructura será más o menos resistente, según se haya realizado la acción de mantenimiento.

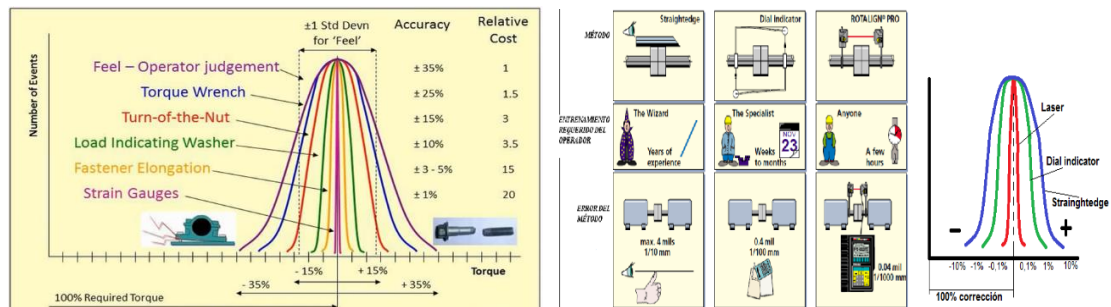


Figura 2.17 Distribución de probabilidad de calidad, en dependencia del método e instrumentos de reparación. (Lifetime Reliability. 2021).

De la misma forma se pueden presentar muchos otros ejemplos, que demuestran que la resistencia del equipo se puede representar a partir de parámetros de monitoreo de la calidad de las reparaciones y los mantenimientos. Así durante la etapa de operación y mantenimiento el activo es sometido a cargas, que pueden superar su resistencia, la cual puede disminuir como consecuencia de mecanismos de deterioro o fallo o por baja calidad de los mantenimientos.

### 2.3 Evaluación de la Confiabilidad total

Al profundizar en las causas de los fallos, se hace evidente que las máquinas fallan porque sus elementos fallan primero. Por tal razón, para la evaluación de la confiabilidad, una buena idea es modelarla como la combinación de elementos conectados entre sí, cada uno de los cuales estará sometido a una carga, que provoca el fallo, cuando supera su resistencia. Cada elemento real, puede fallar de diferentes formas, por lo que, puede ser modelado como la conexión de elementos idénticos, cada uno de los cuales presenta un único modo de fallo, diferente a los demás.

La evaluación de la Confiabilidad total se desarrolla aplicando el Anexo 4.

## 2.4 Valoración del coeficiente de confiabilidad

Una vez obtenido un indicador de la confiabilidad la pregunta obligada es ¿Qué tan elevada debe ser? (Barraza A, 2020)

La respuesta a esta interrogante no es sencilla y como afirma Hogan, la única respuesta concluyente es “Todo depende”: Depende de los objetivos de las pruebas. A la pregunta ¿qué tan alta debe ser una escalera? La respuesta depende de si se quiere cambiar una bombilla en un techo, que no está al alcance de un hombre o si se pretende subir al techo de un edificio de tres pisos. (Hogan, 2004) (pág. 112)

Si el objetivo de una prueba es tomar decisiones sobre una persona (diagnóstico psicológico, selección del personal, licencia para ejercer una profesión) se requiere una prueba de alta calidad (0.90 como mínimo aceptable y 0.95 como la norma deseable). Si en cambio el uso de la prueba es con fines de investigación, se requiere una confiabilidad moderada (0.80 se considera adecuada) (Nunnally y Bernstein, en Hogan, 2004).

Por su parte Rosenthal (en García, 2005) propone una confiabilidad mínima de 0.90 para tomar decisiones sobre la vida de las personas y una confiabilidad mínima de 0.5 para propósitos de investigación.

En esta misma línea de discusión, para determinar el valor de confiabilidad aceptable Kaplan y Sacuzzo (en Hogan, 2004) señalan que la confiabilidad en el rango de 0.7 a 0.8 es suficientemente buena para fines de investigación, mientras que la confiabilidad para una prueba que determine el futuro de una persona debe ser superior a 0.95.

Más allá de estas recomendaciones, otros autores ofrecen escalas completas para la valoración del coeficiente de confiabilidad.

Thorndike y Hagen (1978) consideran que la confiabilidad obtenida debe ser superior a la evaluada en otros procesos de medición por otros métodos.

De Villis (en García, 2005) plantea la siguiente escala de valoración:

- Por debajo de 0.60 es inaceptable
- De 0.6 a 0.65 es indeseable

- Entre 0.65 y 0.7 es mínimamente aceptable
- De 0.7 a 0.8 es respetable
- De 0.8 a 0.9 es muy buena

Por su parte Murphy y Davishofer (en Hogan, 2004) ofrecen la siguiente escala:

- Alrededor de 0.9 nivel elevado de confiabilidad
- Entre 0.8 y 0.9 la confiabilidad es moderada
- Entre 0.7 y 0.8 la confiabilidad es baja
- Por debajo de 0.6 la confiabilidad es inaceptablemente baja.

En la implementación de la metodología actual se toman las consideraciones de Murphy para la turbina de vapor, mientras que para equipos B y C se aplican los criterios de Kaplan y Sacuzzo.

## 2.5 Conclusiones parciales

Una vez concluido el presente capítulo, se ha arribado a las siguientes conclusiones parciales:

1. Se identificaron 6 mecanismos de fallos, entre los de mayor frecuencia de ocurrencia, según los reportes encontrados en la literatura estudiada. Para cada uno de ellos se ha encontrado una expresión, que relaciona la resistencia del activo a la ocurrencia de ese fallo en específico con los parámetros que caracterizan las condiciones de la operación.
2. Las expresiones de la resistencia, incorporan las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, lo que le imprime gran fuerza práctica y veracidad incuestionables, por la experiencia demostrada durante el estudio del comportamiento de materiales bajo diferentes cargas. Las expresiones de la carga se han obtenido en base a parámetros de operación, que además son síntomas del desarrollo de mecanismos de degradación, lo cual permite el seguimiento y monitoreo confiable en tiempo real.
3. Se obtuvo una expresión inédita para el mecanismo de erosión de los álabes producto del impacto de escamas de óxidos, provenientes de los tubos de sobrecalentadores y recalentadores. Esta expresión fue posible, gracias al estudio minucioso del fenómeno de crecimiento de los óxidos de hierro, como la magnetita y su transformación en hematita,

así como de las condiciones que favorecen su fractura y desprendimiento, hasta llegar a la energía que adquieren al viajar junto al vapor que se dirige a la turbina. Por otra parte, se estudió la erosión de los álabes, partiendo de su resistencia al impacto de partículas sólidas.

4. Se relacionaron ambos estudios y se obtuvo la valiosa expresión de utilización práctica, que permite evaluar la probabilidad de erosión de los álabes. Las demás expresiones son el resultado del estudio realizado por otros autores, quienes obtuvieron expresiones cercanas a las que se necesitan, solo se colocaron en la forma conveniente. Estas expresiones dejan el terreno listo para colocar los parámetros de monitoreo y las propiedades de los metales, lo cual puede ser realizado en cualquier tipo de software o aplicación para el tratamiento matemático y representación gráfica, en la actual investigación se utilizó el Excel.

# CAPÍTULO 3 EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

En este capítulo se analiza la validación de los modelos obtenidos y se comparan los resultados matemáticos con las observaciones y evidencias de la ocurrencia de fallos reales y el desarrollo de mecanismos de degradación.

## 3.1 Validación del modelo

Se logró diseñar y aplicar la metodología para calcular la probabilidad de fallo, teniendo en cuenta los diferentes mecanismos de degradación que se investigan. Para cada uno de estos mecanismos se encontró una expresión, que permite realizar la evaluación de la confiabilidad. *Para el caso de erosión por partículas sólidas, la expresión obtenida dentro de la presente investigación no ha sido encontrada en la literatura estudiada, por lo que constituye una novedad científica.*

La validación de los resultados y la demostración de la hipótesis se llevan a cabo con la observación práctica de los fallos reales de la turbina y su comparación con los resultados teóricos de la evaluación de las probabilidades de ocurrencia de dichos fallos. En este sentido, todos los resultados obtenidos se corresponden con lo observado durante 36 años en la operación y mantenimiento de la turbina de vapor de la Termoeléctrica Antonio Guiteras de Matanzas.

La validación de la presente Metodología se puede llevar a cabo, con los datos del tiempo de operación, con los cuales se pueden calcular los indicadores tradicionales como son el MTBF o el MTTF, que se han aceptados como indicadores de la confiabilidad, y además calcular la confiabilidad por el método carga vs resistencia con los datos de ese mismo periodo. También se puede calcular la confiabilidad según su propio concepto:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad 3.1$$

La tasa de fallo  $\lambda$  es la cantidad de fallos por la unidad de tiempo y se calcula dividiendo la cantidad de fallos entre el tiempo ocurrido. El tiempo  $t$  se toma en días de un año, es decir 365.

Si los resultados son iguales, entonces la metodología está validada.



## 3.2 Análisis de los resultados.

A continuación, se evalúan las expresiones determinadas para cada mecanismo de fallo, sustituyendo los valores de las variables de operación y encontrando los parámetros característicos de las distribuciones de la carga y la resistencia.

### 3.2.1 Evaluación de la probabilidad de fallo de los álabes de la turbina, debido a erosión por partículas sólidas

Se obtuvo la expresión (2.11) que permite evaluar la probabilidad de la ocurrencia de erosión por partículas sólidas, provenientes de los óxidos de los metales de los sobrecalentadores de la Caldera. Esta expresión es una de las principales salidas de la presente investigación y constituye novedad científica:

$$\sigma_y = 1.14\rho_{ox} \left( 2A\Delta t e^{-E_{ox}/RT} \right)^{3/2} \left( \frac{F_v}{S} \right)^2 \times 10^{-7} \quad (2.11)$$

Se tomó la base de datos de la operación de los 5 años anteriores al 2018. Los parámetros contenidos en la expresión se expresaron en las unidades de medidas adecuadas y se obtuvieron los siguientes parámetros  $N(\bar{X}, S)$  de distribución de probabilidades de fallo por SPE:

$$\bar{X} = 590,11 \quad S = 140,43 \text{ para la carga}$$

$$\bar{X} = 250,11 \quad S = 25 \text{ para resistencia 1}$$

$$\bar{X} = 772,33 \quad S = 23,02 \text{ para resistencia 2}$$

Para los cálculos se tomaron los datos de 2 rotores, fabricados de materiales diferentes. Estos datos se grafican (Figura 3.1) y se obtiene las distribuciones de probabilidad de fallo.

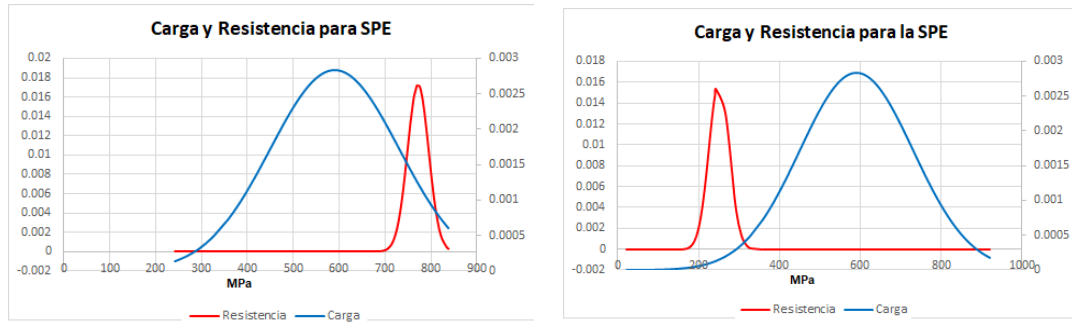


Figura 3.1 Curvas de distribución de probabilidades de los parámetros de resistencia y carga, para álabes fabricados de diferentes aceros. a)  $\sigma_{0.2}=772$  MPa, b)  $\sigma_{0.2}$  de 250 MPa. (Elaboración propia durante la presente investigación).

Para cada caso se determina la distribución normal resultante, obteniéndose:

$$\bar{X} = -340.76; S = 142.86 \text{ y } \bar{X} = 181.57; S = 142.5$$

Lo que corresponde con las curvas de distribución de la Figura 3.2 y sus correspondientes curvas de distribución acumuladas, representadas en la Figura 3.3.

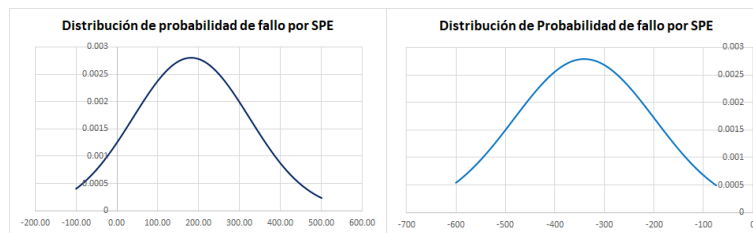


Figura 3.2 Curvas de distribución resultante de los casos de la Figura 3.1. (Elaboración propia)

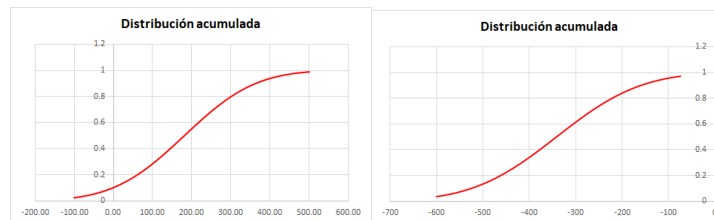


Figura 3.3 Curvas de distribución acumuladas correspondientes a la Figura 3.2. (Elaboración propia)

De las distribuciones acumuladas se determina la probabilidad de fallo, tomando el punto de intersección con el eje Y. De esta forma para el caso b) con límite de elasticidad  $\sigma_{0.2}$  de 250 MPa se obtiene una probabilidad de fallo  $P_f = 0.999$ , mientras que para a)  $\sigma_{0.2}$  de 772 MPa la probabilidad de fallo disminuye hasta 0.1. Se toma  $P_{f1} = 0.1$ , que corresponde con el acero del rotor actual.

Para minimizar el riesgo de fallo por erosión por escamas de óxidos, se deben utilizar materiales resistentes, o mantener los parámetros de operación en rangos que no propicien el crecimiento de los óxidos de hierro. En las Figuras 3.2 y 3.3 se observa, que existe muy alta probabilidad que los álabes del rotor de alta presión sufran erosión por partículas sólidas, si son fabricados de acero con  $\sigma_{0.2}$  muy bajo. El camino más eficaz para evitar la erosión es utilizar materiales en los sobrecalentadores, con energía de activación más alta, con parámetros de operación (temperatura, presión y flujo) adecuados, que minimicen el crecimiento de los óxidos y sobre todo la transformación de la magnetita en hematita. Estos resultados se confirman con las inspecciones realizadas a los álabes del rotor de AMP de la unidad de 330 MW de la CTE A. Guiteras en el año 2010, cuando fue sustituido y además se corresponde con lo descrito en la literatura estudiada (Figura 3.4).



*Figura 3.4 Álabes del rotor de Alta Presión con erosión por partículas sólidas. (Foto tomada por el autor durante la inspección del rotor de AMP en el año 2010, cuando fue sustituido).*

### 3.2.2 Evaluación de la probabilidad de fallo por erosión por gotas de agua

Para evaluar la probabilidad de fallo, se tomó la mayor y la menor longitud de los álabes del RBP;  $r = 1,5$  metros y  $r = 0,5$  metros y los diferentes valores que puede tomar la humedad en el cilindro de baja presión para evaluarlos en la expresión 2.19. Se compara el resultado con la distribución, que refiere la literatura, sobre la resistencia que presentan los álabes a este mecanismo de degradación.

$$E = 4.3(0.01U_p - 2.44)^2 y_1^{0.8} \quad (2.19)$$

$$U_p = \omega * r = \frac{2\pi * rpm}{60} * r = 376,99$$

Para la carga a que están sometidos los álabes se obtiene la expresión (2.22):

$$E_c = 1.33 \times y_1^{0.8} \quad (2.22)$$

Mientras que, para la resistencia se obtiene la expresión (2.23):

$$E_c = 44,46 * y_1^{0,8} \quad (2.23)$$

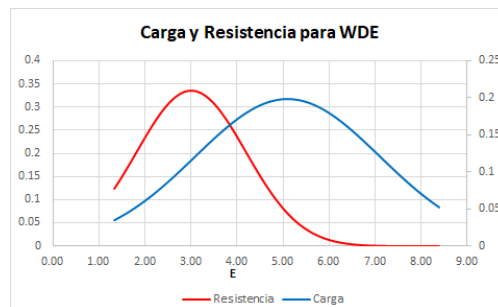
La distribución, que caracteriza la resistencia se construye a partir del conocimiento del rango señalado en la literatura, sobre las investigaciones en rotores reparados por sus fabricantes:  $E_r$  se encuentra en el rango entre 2 y 4:

Con estos datos se obtuvieron los resultados siguientes

$$\bar{X} = 5.09 \quad S = 2.009 \text{ para carga}$$

$$\bar{X} = 3.001 \quad S = 1.19 \text{ para resistencia}$$

Estos datos se grafican (Figura 3.5) y se obtiene las distribuciones de probabilidad de fallo.



*Figura 3.5 Curvas de distribución de probabilidades de que se produzca erosión por gotas de agua, para diferentes largos del álabe, a) 0,5 metros, b) 1.5 metros. (Elaboración propia durante la presente investigación).*

Se determina la distribución normal resultante, obteniéndose los parámetros siguientes:

$$\bar{X} = -2.09; S = 2.33 \text{ y } \bar{X} = -167.21; S = 67.17$$

Lo que corresponde con las curvas de distribución de la Figura 3.6 y sus correspondientes curvas de distribución acumuladas, representadas en la Figura 3.7.

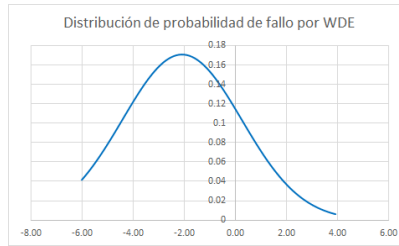


Figura 3.6 Curvas de distribución resultante de los casos de la Figura 3.5. Elaboración propia

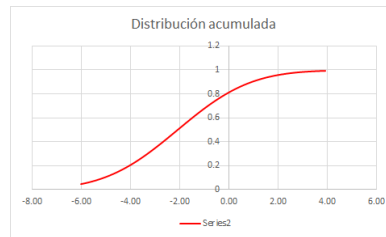


Figura 3.7 Curvas de distribución acumuladas correspondientes a la Figura 3.6. (Elaboración propia)

Las distribuciones acumuladas revelan que para el caso de los álabes con  $r = 0.5$  m, la probabilidad de fallo es de 0.8, mientras que para  $r = 1.5$ , la probabilidad es de 0.99. Este resultado indica que, para los álabes de los últimos pasos, siempre habrá erosión por gotas de agua, tal como lo indica la literatura y se ha corroborado en las inspecciones del rotor (ver Figura 3.8). Tomamos  $Pf2 = 0.8$  para los álabes de 0.5 m de largo.

Los resultados se corroboran con la inspección visual al rotor de baja presión de la Turbina de baja presión, llevada a cabo en el año 2023. Para los álabes del último paso del rotor existe elevada probabilidad de erosión por gotas de agua, mientras que los pasos anteriores tienen baja probabilidad de padecer este mecanismo de degradación.

La erosión de álabes rotatorios en las regiones donde hay humedad en las turbinas de vapor es un problema vigente. Comúnmente se trata de mantenerla bajo control usando métodos semi empíricos de diseño para obtener álabes con tiempos de vida aceptables; sin embargo esto puede llegar a ser inadecuado en lugares donde ocurren cambios significativos en los parámetros de diseño, tales como la longitud del álabe rotatorio (y por consiguiente de la velocidad en la punta), los materiales que lo componen, velocidades del vapor, llevándolos más allá de los rangos para los cuales la validez del método fue establecida.

Las turbinas de capacidades de 300 a 800 MW se diseñan para operar con temperaturas de vapor recalentado de hasta 565 °C. Al reducir esta temperatura hasta 540 °C, se incrementa la humedad final en el diagrama de Mollier de 8 a 13 %. La modernización de las etapas del cuerpo de baja presión con la instalación de anillos de refuerzo exteriores en las coronas rotatorias, incrementan su eficiencia, pero también incrementa la humedad final. Lo anterior conlleva a un aumento de extensión espacial y una tasa mayor del desgaste por erosión de los álabes rotatorios en la última etapa, a pesar de la presencia de desviación del vapor de regeneración anterior al diafragma y del dispositivo de remoción de humedad periférica, posterior a éste.

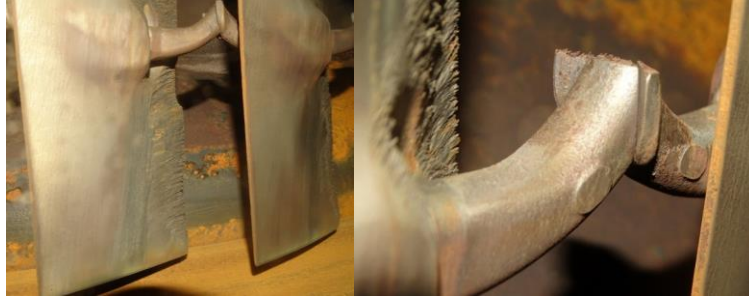
Los efectos de los parámetros individuales sobre la acción de la erosión de los álabes finales se detallan a continuación:

Contenido de humedad: El tamaño de las gotas de agua responsables de la erosión, aparece únicamente en el borde de salida de los álabes estacionarios desde los cuales la película se desprende. Esta película se forma sobre ambos lados de los álabes estacionarios por razones distintas. La película que se recolecta en el lado cóncavo se debe a las gotas que son centrifugadas como resultado de un cambio en la dirección de las líneas de corriente. La película del lado convexo se forma de las gotas que se centrifugan de la penúltima corona de álabes rotatorios. Esto significa que, la erosión de los álabes finales depende del contenido de humedad en el vapor que entra en los últimos álabes estacionarios, debido a que este contenido determina cuánta agua se deposita en ambos lados de los álabes estacionarios.

Velocidad en la punta de los álabes finales: Al aumentar la velocidad en la punta también aumenta la velocidad del vapor, pero la velocidad de las gotas de agua que llegan al borde de salida de los álabes estacionarios es siempre cercana a cero. Si la aceleración de las gotas que se atomizan desde los álabes estacionarios permanece igual para toda la longitud de los álabes finales, la erosión aumenta como función de la velocidad en la punta. Sólo si no hay una velocidad relativa entre el vapor y las gotas, el agua fluye con el vapor a través del área de los álabes finales sin causar daños.

Densidad del vapor: La densidad del vapor entre las coronas de álabes estacionarios y rotatorios de la última etapa afecta la aceleración y la atomización de las gotas de agua que se atomizan desde el borde de salida de los álabes fijos. Los altos valores de la densidad del vapor conllevan a una aceleración elevada y formación de gotas de agua pequeñas. La densidad del vapor, y por tanto su influencia, se encuentra relacionada a la presión del vapor entre las coronas de álabes estacionarios y rotatorios finales.

Influencia del diseño del álabe y la carcasa: Otros factores que influyen en el grado de erosión dependen no de las condiciones de operación, sino del diseño adecuado de las últimas etapas de la turbina.



*Figura 3.8 Evidencias de erosión por gotas de agua en los álabes del último paso del RBP de 1,5 metros de largo. (Elaboración propia durante la presente investigación 2023).*

Para valores de E menores que 2, se considera que no existen riesgos de fallo, para valores entre 2 y 4, el riesgo es moderado, mientras que valores mayores que 4 son inadmisibles.

De lo anterior se desprende que el problema de erosión de álabes se produce principalmente, por la transferencia de energía cinética durante el impacto de las gotas de agua sobre los álabes rotatorios.

### 3.2.3 Evaluación de la probabilidad de fallo por choque térmico.

Para la evaluación de la probabilidad de fallo por choque térmico se utilizaron las expresiones obtenidas en investigaciones previas, en las cuales se determinó la temperatura del metal  $T$ , a partir de la cual se puede producir choque térmico. Se toman los parámetros del vapor registrados en la base de datos de la operación de la unidad durante un año y a partir de ellos, se calcula la densidad del vapor para el rango de presión y temperaturas obtenidos durante ese año de operación, para lo cual se utilizan las mismas expresiones obtenidas para el análisis de erosión por partículas sólidas.

$$\sigma_f = 6.2 \frac{E\alpha}{1-\mu} (\rho d V / g)^{0.8} Pr^{0.33} \times T_0 \times 10^{-3} \quad (2.27)$$

Con estos datos se obtuvieron los resultados siguientes

$$\bar{X} = 389.07 \quad S = 122.6 \text{ para carga 1}$$

$$\bar{X} = 540.86 \quad S = 7.27 \text{ para resistencia}$$

Estos datos se grafican (Figura 3.9) y se obtiene las distribuciones de probabilidad de fallo.

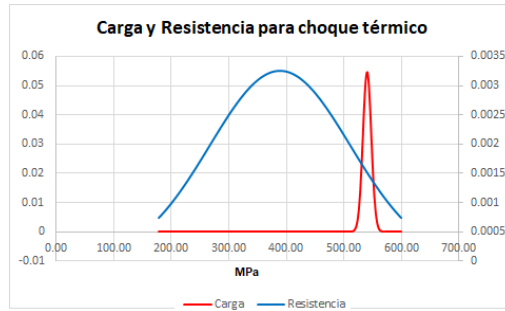


Figura 3.9 Curvas de distribución de probabilidades de la carga y la resistencia que se produzca choque térmico. (Elaboración propia 2023)

Se determina la distribución normal resultante, obteniéndose:

$$\bar{X} = 151.79; S = 122.82$$

Lo que corresponde con las curvas de distribución de la Figura 3.10 y sus correspondientes curvas de distribución acumuladas, representadas en la Figura 3.11.

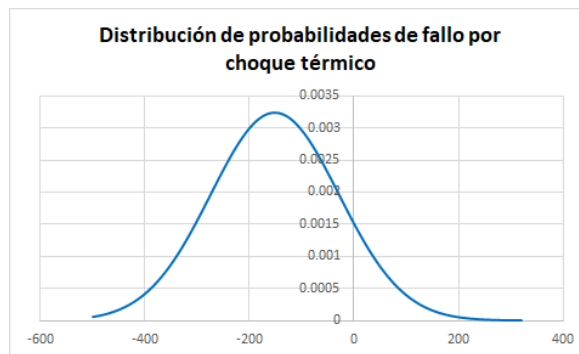


Figura 3.10 Curva de distribución de probabilidades de que se produzca choque térmico. (Elaboración propia durante la presente investigación)

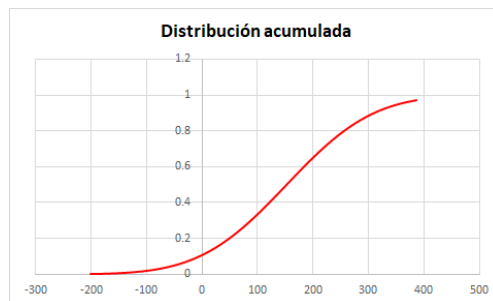


Figura 3.11 Curva de distribución acumulada de la distribución de la figura 3.10 (Elaboración propia del autor).



La curva de distribución de choque térmico indica que, para las temperaturas de trabajo, la probabilidad de fallo por choque térmico  $P_{f3}$  será 0.12. Este fallo se evita con sistemas de protección, entonces la probabilidad de fallo se calculará, según lo indicado en el Anexo 3, para sistemas en paralelo. De la Figura 3.9 se aprecia que, durante el funcionamiento de la unidad, la temperatura de los metales de la turbina siempre será superior a la de choque térmico  $T_0$ , y la turbina tendrá riesgo de fallar, por lo que, de llegar un vapor con baja temperatura, o lo que es peor aún, que llegue agua, se producirá choque térmico, lo que ha sido uno de los eventos más frecuentes de averías. En el año 2004, en la unidad de la termoeléctrica de Matanzas ocurrió la flexión del rotor de AMP cuando durante una parada planificada, el flujo del agua de atemperamiento del vapor sobrecalentado aumentó considerablemente, provocando la disminución de la temperatura del vapor.

La Figura 3.10 presenta la distribución de probabilidades calculadas para las temperaturas que causan choque térmico. En el ejemplo se consideró que la temperatura del metal, sin embargo, si se comprueba para temperaturas inferiores, entonces disminuye considerablemente la probabilidad de fallo por choque térmico.

Como se ha demostrado, la probabilidad de fallo por choque térmico dependerá de los equipos periféricos, si están en mal estado técnico, o son operados de forma incorrecta, entonces se producirá este mecanismo de degradación.

### **3.2.4 Evaluación de la probabilidad de fallo por agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC)**

El fallo estructural debido a la corrosión bajo tensión (SCC) es prácticamente imprevisible, y depende del incremento de los esfuerzos. El tiempo de fallo es la suma de dos partes: un período de inducción que determina la mayor parte de la duración de la vida (días, semanas o años) y la rapidez del período de propagación, típicamente horas o minutos. Las grietas suelen iniciarse en el punto de máxima concentración de tensiones y se propaga en planos macroscópicamente perpendiculares a la tensión aplicada, conduciendo el agrietamiento a la disminución de la sección útil del material, lo que puede dar lugar a roturas catastróficas.

Las grietas son frágiles sin deformación y el camino de las grietas es una característica del metal o aleación. Para algunas aleaciones es intergranular, para otras es transgranular.

La primera línea de defensa para controlar el agrietamiento por corrosión bajo tensión es en las etapas de diseño y fabricación, al elegir un material que no sea susceptible a SCC en el entorno de servicio, y al procesarlo y fabricarlo correctamente.

Como uno de los requisitos para el agrietamiento por corrosión bajo tensión es la presencia de tensión en los componentes, un método de control es eliminar esa tensión, o al menos reducirla por debajo del umbral de tensión para SCC. Por lo general, esto no es factible para las tensiones de trabajo (la tensión que el componente debe soportar), pero puede ser posible cuando la tensión que causa el agrietamiento es una tensión residual introducida durante la soldadura o la formación. Las tensiones residuales se pueden aliviar mediante el recocido de alivio de tensión, y esto se usa ampliamente para los aceros al carbono. Estos tienen la ventaja de un umbral de tensión relativamente alto para la mayoría de los entornos, por lo que es relativamente fácil reducir las tensiones residuales a un nivel lo suficientemente bajo. En contraste, los aceros inoxidable austeníticos tienen un umbral de tensión muy bajo para el ambiente de cloruro.

Como se aprecia de las expresiones de cálculo, el crecimiento de las grietas aumenta considerablemente con la temperatura del metal, y los aceros con valores de resistencia más elevados (límite de fluencia) son más sensibles a padecer de SCC. Todos estos factores se toman en cuenta por los diseñadores y fabricantes de turbinas para la elección de los materiales con los que se fabrican o reparan los componentes de las mismas. Para los discos y álabes de los rotores de BP en la actualidad se utilizan aceros con extremadamente elevados valores de resistencia al SCC. Al mismo tiempo, los operadores de las centrales térmicas son responsables por mantener el tratamiento del agua a tales niveles, que garantice un vapor que no sea corrosivo y prevea el fallo por SCC. Para el análisis se utilizaron las expresiones (2.31) y (2.32) evaluadas para los valores de los parámetros de la base de datos.

$$\ln(\vartheta) = -16.829 - \frac{4057}{T} + 0.04\sigma_{0.2} \quad (2.31)$$

$$\sigma_{0.2} = 420.73 + \frac{1.01 \times 10^5}{T} + 25 \ln(\vartheta) \quad (2.32)$$

Con estos datos se obtuvieron los resultados siguientes

$$\bar{X} = 283.76 \quad S = 1.12 \text{ para resistencia}$$

$$\bar{X} = 300.00 \quad S = 46.30 \text{ para carga}$$

Estos datos se grafican (Figura 3.12) y se obtiene las distribuciones de probabilidad de fallo.

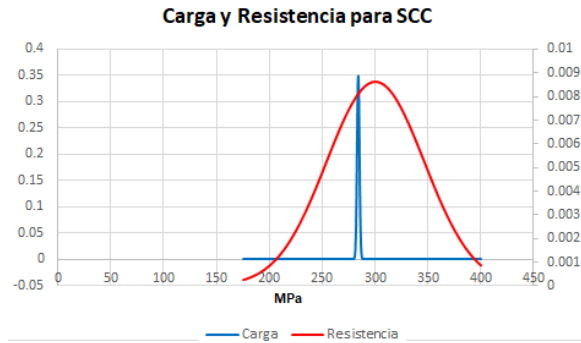


Figura 3.12 Curvas de distribución de probabilidades para la carga y la resistencia al fallo por SCC, evaluado a través de la velocidad de crecimiento de la grieta. (Elaboración propia 2023)

Se determina la distribución normal resultante, obteniéndose:

$$\bar{X} = 139.12; S = 42.19 \text{ y } \bar{X} = 16.24; S = 46.31$$

Lo que se grafica en las curvas de distribución de la Figura 3.13 y sus correspondientes curvas de distribución acumulada, representadas en la Figura 3.14.

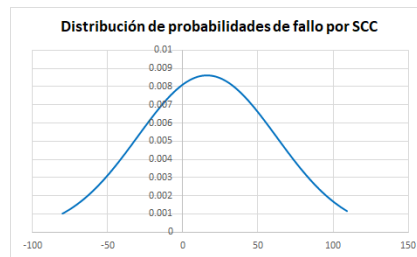


Figura 3.13 Curvas de distribución resultantes para los casos de la figura 3.12. Elaboración propia.

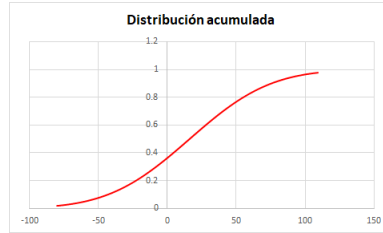


Figura 3.14 Curvas de distribución acumulada de las distribuciones de la figura 3.13. Elaboración propia.

Para el caso de fallo por SCC, se debe tener en cuenta que, para los materiales con  $\sigma_{0,2}$  bajo, la velocidad de crecimiento permisible establece una probabilidad de fallo  $P_f$  de 0.37, mientras que para las condiciones de operación con materiales con mayores  $\sigma_{0,2}$  la probabilidad de fallo es prácticamente nula. En la práctica se debe vigilar las condiciones de operación y los cambios de las propiedades de los materiales ya que se pueden dar situaciones de fallo por este mecanismo de degradación, como en la turbina de baja presión, de la CTE A. Guiteras en el año 2023. Los resultados coinciden con la práctica, que la probabilidad de fallo por SCC depende fuertemente del valor del límite de fluencia  $\sigma_{0,2}$  a la temperatura de trabajo.

### 3.2.5 Evaluación de la probabilidad de daño por creep

Para evaluar la resistencia de los álabes al fallo por fluencia (creep) se utilizan las expresiones obtenidas por Larzon y Miller, y utilizadas por muchos otros autores. Para evaluar la carga a que están sometidos estos componentes, se toman los esfuerzos mecánicos, producidos por la fuerza centrífuga, sobre los diferentes álabes, que son de radios diferentes.

$$\sigma = 1652,36 - 59,23LMP \quad (2.36)$$

$$\sigma = 1652,36 - 59,23(20 + \log t_r)T \quad (2.37)$$

$$\sigma_c = 0,142\rho r^2 = 1,15r^2 \quad (2.37')$$

Con estos datos se obtuvieron los resultados siguientes

$$\bar{X} = 378.41 \quad S = 49.11 \text{ para resistencia}$$

$$\bar{X} = 197.11 \quad S = 63.60 \text{ para carga 1}$$

Estos datos se grafican (Figura 3.15) y se obtiene las distribuciones de probabilidad de fallo.



Figura 3.15 Curvas de distribución de probabilidades de la carga y la resistencia al fallo por Creep.  
(Elaboración propia)

Se determina la distribución normal resultante, obteniéndose:

$$\bar{X} = 282.08; S = 77.05$$

Lo que corresponde con la curva de distribución y su correspondiente curva de distribución acumulada, representadas en la Figura 3.16.

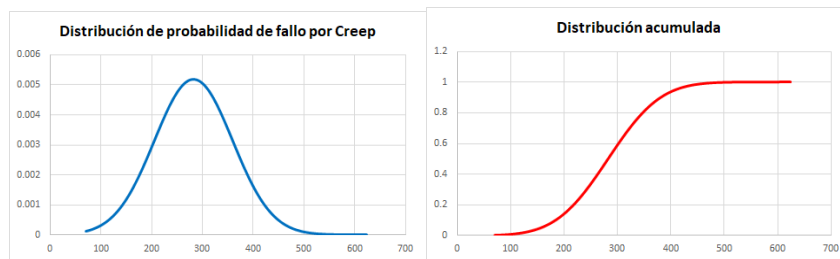


Figura 3.16 Curvas de distribución de probabilidades resultante y su distribución acumulada para el fallo por fluencia (Creep). (Elaboración propia)

Para el caso de fallo por fluencia se obtiene una probabilidad de fallo  $P_f$  cercana a 0, lo que significa que siempre que se mantengas las condiciones de operación, el riesgo es bajo y sólo para casos de aumentar la velocidad de rotación de los rotores o muy elevada temperatura del vapor, aparecerá la probabilidad de la fluencia en los metales.

Los resultados demuestran que, los álabes fabricados de aceros, resistentes a los demás mecanismos de fallo, presentan elevada resistencia al fallo por creep, existiendo baja probabilidad de fallo por este mecanismo, que se manifiesta sólo en aquellas ocasiones donde aumentan las tensiones debidas a la fuerza centrífuga, como son aquellos casos cuando se produce la sobrevelocidad de la turbina.

### 3.2.6 Evaluación de probabilidad de daños por fatiga térmica

Para determinar la resistencia a la fatiga térmica, se grafica la curva S-N, según lo establecido en el Capítulo II de la presente Investigación, y se muestra en la figura 3.17

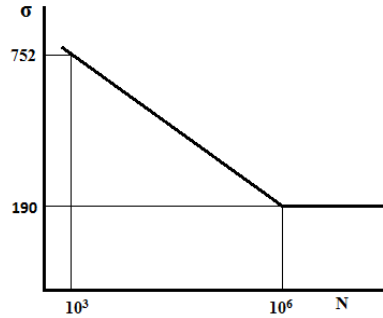


Figura 3.17 Curvas S-N para la evaluación de la resistencia a la fatiga térmica. (Elaboración propia durante la presente investigación)

Para la curva de la Figura 3.17 se obtiene la expresión para encontrar los valores de tensión dependiendo de los ciclos de operación:

$$\sigma_N = 1315 - 0,563 * N \quad (3.1)$$

Posteriormente y teniendo en cuenta los coeficientes de influencia se obtiene la expresión de cálculo de la resistencia al fallo por fatiga:

$$\sigma_r = \frac{235319,76}{460 + (1,8 * T_{\sigma C} + 32)} \quad (3.2)$$

Para determinar la carga a la que están sometidos los componentes de la turbina para el fallo por fatiga térmica, se utiliza la expresión:

$$\sigma = \pm \frac{E\alpha\Delta T}{1-\mu} \quad (3.3)$$

$$\sigma_c = \frac{620E+09 * 1,4E-05}{1-0,3} \Delta T \quad (3.4)$$

$$\sigma_c = 3,2 * (T_{\sigma C} - 300) \quad (3.5)$$

Con estos datos se obtuvieron los resultados siguientes

$$\bar{X} = 161.78 \quad S = 18.56 \text{ para resistencia}$$

$$\bar{X} = 770.79 \quad S = 23.25 \text{ para carga}$$

Estos datos se grafican (Figura 3.18) y se obtiene las distribuciones de probabilidad de fallo.

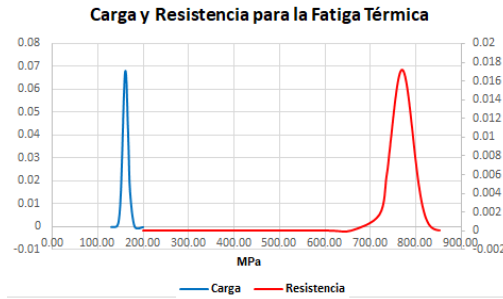


Figura 3.18 Curvas de distribución de probabilidades para la carga y la resistencia al fallo por fatiga. (Elaboración propia 2023)

Se determina la distribución normal resultante, obteniéndose:

$$\bar{X} = 609.01; S = 29.75$$

Lo que corresponde con la curva de distribución y su correspondiente curva de distribución acumulada, representadas en la Figura 3.19.

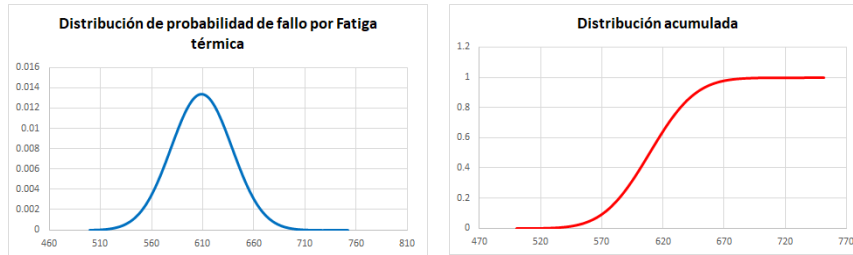


Figura 3.19 Curvas de distribución de probabilidades resultante y su distribución acumulada para el fallo por fatiga térmica. (Elaboración propia 2023)

La fatiga térmica tiene baja probabilidad de ocurrencia  $Pf_6$  igual a 0.01, para el número de ciclos calculados para la vida útil de las turbinas. Los materiales se seleccionan acorde a las cargas que serán sometidos, para el número de ciclos previsto. Sin embargo, es de significar, que los ciclos de arranque y paradas de las turbinas, mayores que los previstos en el diseño, aumentan considerablemente el riesgo de fallo por fatiga térmica.

Los resultados demuestran que existe muy baja probabilidad de fallo por fatiga térmica, pues los elementos de la turbina de vapor se fabrican con materiales que presentan elevada resistencia a este mecanismo de degradación y cuentan con sistemas de protección.

### 3.2.7 Evaluación de probabilidad de fallo por vibraciones mecánicas

Para el caso de fallo debido a altas vibraciones mecánicas

$\bar{X} = 9.75$       $S = 5.6$  resistencia vibraciones absolutas

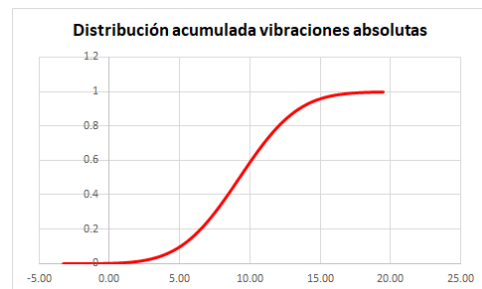
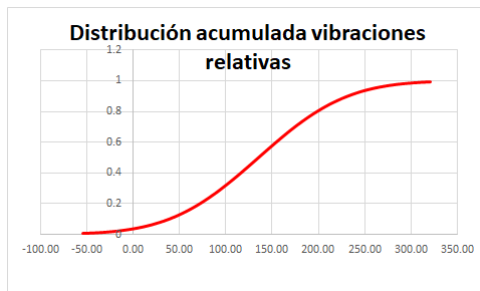
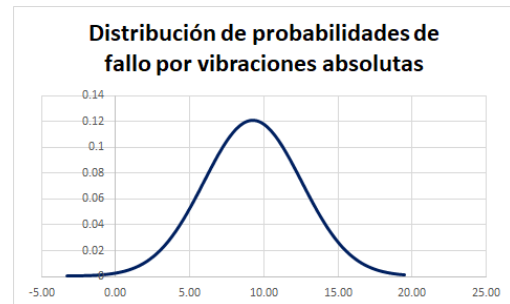
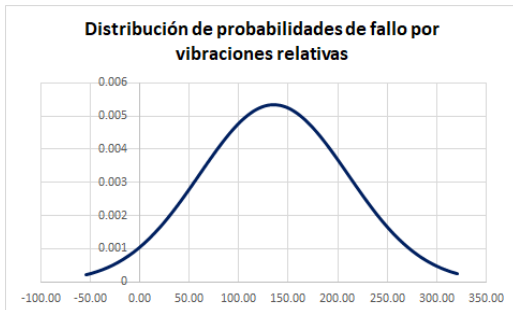
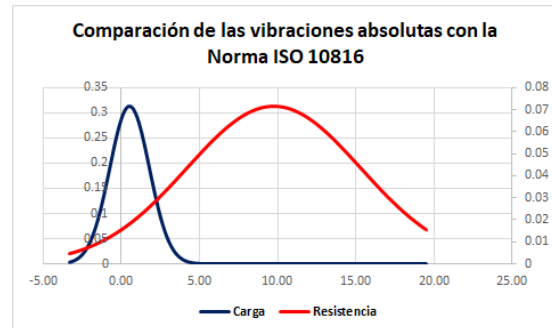
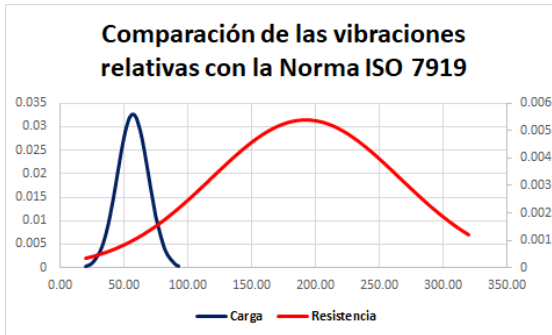
$\bar{X} = 1.27$       $S = 0.5$  carga

$\bar{X} = 9.2$       $S = 3.3$  resultante

$\bar{X} = 192.5$       $S = 73.8$  resistencia vibraciones relativas

$\bar{X} = 57.4$       $S = 12.2$  carga

$\bar{X} = 135.1$       $S = 74.8$  resultante



$P_f = 0.003$  para las vibraciones absolutas y  $P_f = 0.04$  para las vibraciones relativas.



### 3.2.8 Evaluación de la Confiabilidad total

Se ha evaluado hasta aquí la probabilidad de fallo para estos 7 mecanismos de degradación. A continuación, se calcula la confiabilidad de la operación, teniendo en cuenta los parámetros con que se opera y el riesgo de ocurrencia de estos fallos, aplicando el Anexo 3.

$$C_t = C_1 * C_2 * C_3 * C_4 * C_5 * C_6 * C_7$$

$$C_1 = 1 - P_{f1} = 1 - 0.1 = 0.9;$$

$$C_2 = 1 - P_{f2} = 1 - 0.8 = 0.2;$$

$$C_3 = (1 - (1 - C_{3.1}) (1 - C_{3.2})) = 1 - P_{f3} * P_{f3.1} = 1 - (0.12 * 0.1) = 1 - 0.012 = 0.988$$

$$C_4 = 1 - P_{f4} = 1 - 0.37 = 0.63;$$

$$C_5 = 1 - P_{f5} = 1 - 0.01 = 0.99;$$

$$C_6 = 1 - P_{f6} = 1 - 0.01 = 0.99;$$

$$C_7 = C_a * C_r = (1 - P_{fa}) (1 - P_{fr}) = (1 - 0.003) (1 - 0.04) = 0.997 * 0.96 = 0.957$$

$$C_t = 0.9 * 0.2 * 0.998 * 0.63 * 0.99 * 0.99 * 0.957 = 0.105$$

Además, para incluir la influencia de la calidad de las reparaciones, se debe incluir la confiabilidad del mantenimiento  $C_m$ , que se determina aplicando el método carga –resistencia, según lo descrito en la presente Tesis.

### 3.2.9 Aplicación de los criterios de aceptación de la Confiabilidad

Se ha obtenido una Confiabilidad  $C_t = 0.105$ , que según los criterios de evaluación es inaceptablemente baja. Sin embargo, al analizar los resultados se observa, que la razón fundamental es la alta probabilidad de fallo por erosión por gotas de agua, que se confirma en la práctica. Como la erosión por gotas de agua es prácticamente inevitable en el rotor de baja presión, se toman medidas desde el diseño y la fabricación, por lo que es conveniente no tomar este mecanismo de fallo para la evaluación de la confiabilidad, ya que distorsiona los resultados y no aporta nada para la gestión de la operación y el mantenimiento.

Si no se tiene en cuenta este mecanismo de fallo, entonces quedaría que  $C_t = 0.53$  que, aunque es muy superior al valor anterior, todavía no cumple las exigencias de buena confiabilidad. Al realizar un nuevo análisis, se evidencia que es el fallo por SCC el que hace disminuir la confiabilidad, y se hará necesario operar la máquina de forma tal que impida la formación de vapor saturado con contenido corrosivo. Si

no se tiene en cuenta este mecanismo de degradación entonces la confiabilidad aumenta hasta el valor de 0.85, que satisface la condición de operación confiable.

### 3.3 Conclusiones parciales

Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. Se ha obtenido un valor de la confiabilidad del sistema de la turbina de 0.105. Quiere esto decir que, es altamente probable que en la turbina se produzca uno o varios de estos daños, analizados en la presente investigación. La erosión por partículas sólidas va a tener lugar siempre, aunque el empleo de materiales resistentes puede disminuir considerablemente este daño. La erosión por gotas de agua tendrá lugar en los álabes de las últimas etapas del rotor de baja presión, sobre todo en los álabes de más de 1 m de longitud, los cuales se fabrican para que soporten cierta cantidad de erosión, sin que esto constituya un mayor riesgo.
2. El choque térmico se minimiza instalando sistemas de protección, que limitan la entrada de vapor frío a la turbina, ya que la temperatura de trabajo de los metales siempre será superior a la temperatura de choque térmico. El agrietamiento por corrosión bajo tensión, es uno de los fenómenos más peligrosos, y es posible de evitar, controlando los parámetros químicos del vapor, evitando el vapor corrosivo en la turbina, ya que el material de los componentes de la turbina presenta adecuada resistencia, aunque pueden existir condiciones de operación que, favorecen la ocurrencia de este fenómeno.
3. Los mecanismos de creep y fatiga son auto excluyentes, es decir el material puede fallar o por creep o por fatiga térmica, pero siempre habrá probabilidades de fallo por uno de los dos. Es fácil determinar que, la erosión de los álabes por gotas de agua es el mecanismo de degradación que más está influyendo en el resultado de la presente investigación.
4. Queda el terreno preparado para darle seguimiento a la Confiabilidad, como indicador de las necesidades de mantenimiento y reparación, y además como indicador de la urgencia de dichas acciones. Cuando se detecta una baja confiabilidad, se analiza cuál de los mecanismos de fallo es el que se ha disparado, con lo cual se puede diseñar el programa

de mantenimiento para minimizar o eliminar este riesgo y además determinar el plazo para la ejecución. Cuando se quiere minimizar la ocurrencia de un fallo, siempre que sea posible, se deben instalar sistemas de seguridad, como para el caso del fallo por choque térmico, lo cual eleva considerablemente la confiabilidad.

# CONCLUSIONES

Como resultado final del trabajo desarrollado, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones:

1. En la presente investigación se obtuvo una expresión para el fallo de erosión por partículas sólidas que constituye novedad científica, ya que no fue encontrada en la literatura estudiada, como ha sido señalado en el Capítulo II. Se logró evaluar la probabilidad de fallo, para los 6 mecanismos de degradación seleccionados. Este proceso se pudo realizar en Excel, lo cual imprime elevada utilización práctica, por parte de los ingenieros de la industria, quienes no siempre dominan las aplicaciones como la Inteligencia artificial o el Matlab.
2. Para la aplicación de la metodología, se estudió la base de datos de los parámetros de operación de 5 años, a partir de los cuales se determinaron los estadísticos correspondientes a la distribución normal de las variables que representan la carga. Se estudiaron los datos ofrecidos por los fabricantes sobre las propiedades mecánicas de los metales con que se fabricaron los elementos de la turbina y también se identificaron los estadísticos de la distribución normal de probabilidades de la resistencia. Estos datos se evaluaron en las expresiones obtenidas para cada mecanismo de degradación, hasta llegar a calcular la probabilidad de fallo, bajo esas condiciones.
3. La actual investigación reviste una gran importancia práctica, porque logró aplicar el método “carga – resistencia”, que otros autores han recomendado, pero sin ofrecer la metodología. Este método permite evaluar la confiabilidad desde diferentes puntos de vista. Como en la presente investigación, puede aplicarse para la gestión del mantenimiento y las acciones de reparación, sin embargo, si se define el fallo, como aquellos eventos que ponen en riesgo la conexión de la planta al SEN, entonces se gestionarán los riesgos, y los mecanismos que pueden conducir a la salida de servicio de la unidad, y encontrar con adecuada eficacia, las acciones para elevar la confiabilidad de la operación. Además, permite aplicar la gestión por Riesgo, ya que, al definir adecuadamente las consecuencias de los fallos, el Riesgo se calcula

como el producto de la probabilidad del fallo, por sus consecuencias. Por otra parte, se puede emplear para definir el camino para elevar la confiabilidad de los sistemas, es decir definir qué es más factible, contar con repuestos en el almacén, o montar equipos en paralelo.

4. Los resultados obtenidos, es decir, la probabilidad de ocurrencia de los mecanismos de degradación, y en sentido general la Confiabilidad de la operación de la turbina de vapor, se corresponden con las observaciones prácticas y con los resultados de otras investigaciones publicadas, sobre todo aquellas llevadas a cabo por fabricantes y empresas especializadas en el mantenimiento y reparación de turbinas de vapor. Se obtiene directamente la probabilidad de fallo de la turbina, teniendo en cuenta los mecanismos de fallo seleccionados.

## RECOMENDACIONES

Basadas en las conclusiones obtenidas y para la extensión futura del presente trabajo, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. La metodología descrita en la presente investigación debe ser aplicada a los demás activos principales de la Planta, como son el Generador de vapor (Caldera), Generador eléctrico y Transformador principal. También debe ser aplicada a los equipos auxiliares. Esto permite caracterizar la operación general de la planta, y en el momento de alterarse la confiabilidad, rápidamente se puede determinar el activo, que ha causado tal alteración, por lo tanto, se pueden establecer programas para su restablecimiento.
2. Las principales recomendaciones de la presente investigación se refieren a la continuidad que se le debe dar al tema investigado, sobre todo en la combinación de este método con la aplicación de la Inteligencia Artificial. Este método debe ser aplicado a otros mecanismos de fallo de la turbina. Además, es imprescindible que se aplique a la unidad generadora en su totalidad, que permitirá conocer la confiabilidad con que se opera, mediante un solo indicador, en los casos que se vea afectada la confiabilidad se pueden realizar análisis para identificar el elemento en riesgo de fallo, así como el mecanismo de fallo, por tanto, se podrán tomar medidas para la preparación de la reparación o variar los parámetros de operación de forma que disminuya la probabilidad de fallo.
3. La actual metodología se debe aplicar periódicamente, cada vez que se tengan los resultados del diagnóstico de los metales, cuyas propiedades mecánicas y físicas van cambiando con el tiempo y las condiciones de uso.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Bobrowsky, A. “The applicability of ceramics ceramals as turbine blade materials for the newer aircraft power plants”. N.York: ASME, 1949.
- Aghdasi, M.R. Teymourtash, A.R., y Lakzian, E. “Optimization of the pitch to chord ratio for a cascade turbine blade in wet steam flow. Applied Thermal Engineering, 211,118,445, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118445>
- Aguilar, J. y Cerrada, M. “Control de fallas en Procesos Industriales: Una propuesta usando Sistemas Híbridos Inteligentes” Venezuela. Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. 2005
- Ajay Kumar. “A big data driven sustainable manufacturing condition-based framework for maintenance prediction”. Bharti School of Telecommunication Technology and management, Indian Institute of Technology, Delhi, India, 2018
- Aladon LTD. “Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM2)”, traducido y adaptado por Carlos Mario Pérez J. [www.soporteycia.com.co](http://www.soporteycia.com.co), Aladon LTD, Inglaterra 2012
- Alexander, M. Ernest, R. and Munson, S.S. “Optimization of time-temperature parameters for creep and stress rupture, with application to data from german cooperative long-time creep program”. Lewis Research Center, Cleveland, Ohio. Technical Note NASA TN D-2975. 1965
- Altmann, C. “El Análisis de Causa Raíz, como herramienta en la mejora de la Confiabilidad” 2010. [www.mantenimientomundial.com](http://www.mantenimientomundial.com)
- Amin A. “Power plant condition monitoring”, Rotating Machine Consultant, Worley Parsons. Reliability guideline power plant dynamic model verification using PMUs, North American Reliability Corporation, september 2016
- Antonio R. “Condition monitoring of a wind turbine drive train based on its power dependant vibrations”, NSIRC, Cambridge, Cambridgeshire, United Kingdom, 2018.
- Armitt, J. “The spalling of steam-grown oxide from superheater and reheater tube steels”. Central electricity research laboratories Kelvin Avenue, Leatherhead, Surrey, KT22 7SE, England. FP-686 Technical planning study 76-655. Final report, February 1978
- ASM Hadbook “Faileru Analysis and prevention” vol.11 1992 Citado por Coltters Raúl en sitio web: [analisisdefractura.com](http:// analisisdefractura.com) en 2013.
- Averkina, del AOO NPO Central Boiler and Turbine Institute (TsKTI) en Rusia

- Bagaviev, A. "Life Assessment of Turbine Components based on Deterministic and Probabilistic Procedures" International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 15, No. 2, pp. 19-21. 2004
- Bangalore, P. "Analysis of SCADA data for early fault detection, with application to the maintenance management of wind turbines", Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment, Gothenburg, Sweden, 2018
- Barraza A. "Confiabilidad?" Apuntes sobre Metodología de la investigación. N°6, enero 2020. Universidad Pedagógica de Durango.
- Bazovsky I. "Reliability Theory and Practice" 2020. Predictiva21. Editorial Dove. Libros
- Buessem, W. «The ring test and its application to thermal shock problems,» Metallurgy group, Ohio, 1950.
- Bustamante A., "Fiabilidad estructural", Universidad Politécnica de Madrid, España 2010
- Cabrera J. "Plataforma básica para un enfoque del mantenimiento centrado en la confiabilidad", 2003. Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento, CUJAE, Cuba
- Cabrera J. y de la Torre F. "Introducción a la inspección basada en riesgo" 2018. Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento, CUJAE, Cuba
- Callister W. "Ciencia e Ingeniería de los materiales 1" Editorial Reverté. Universidad de Barcelona, España. ISBN 978-84-291-7252-2. 2007
- Camaraza, Y. García O. «Mathematical deduction of a new model for calculation of heat transfer by condensation inside pipes» Elsevier, Matanzas, Cuba, 2019.
- Camaraza-Medina, Y., Hernández-Guerrero, A. y Luviano-Ortiz, J.L. "Experimental study on influence of the temperature and composition in the steels thermo physical properties for heat transfer applications. Journal of thermal Analysis and Calorimetry, 147(21), 11805-11821. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11410-8>
- De La Torre, F. "Control Estadístico Multivariante de Proceso, una perspectiva del Monitoreo de la Condición de Turbinas". Cuba. CUJAE. CEIM. 2005
- Dekys, V. "Condition monitoring and fault diagnosis", XXI International Polish-Slovak Conference "Machine Modeling and Simulations, Department of Applied Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, University of Zilina, Univerzita 1, 010 26 Zilina, Slovak rep, 2016"
- Del Castillo, A. "Estadística y Fiabilidad en el Mantenimiento" [libro digital] Habana, CUJAE. 2003



- Dooley, B. “Practical observation and interpretation of oxide growth and exfoliation in steam” PPCHEM 2019
- Durán J.B, “Nuevas tendencias en el mantenimiento en la industria eléctrica”, IEEE, España 2018
- Evtech. Soluciones integrales. “La curva PF en el Mantenimiento Centrado en Fiabilidad RCM” (en línea, <https://evtech.cl>) 2019
- García Cirilo H. “La medición en ciencias sociales y en la psicología”, en estadística con SPSS y metodología de la investigación, de René Landeros Hernández y Mónica T González Ramírez, Mexico, Trillas. 2006
- García S. “Operación y mantenimiento de centrales de ciclo combinado”, Renovetec, España 2008
- García, S. Turbinas de vapor. [electrónico] Renovetec. Madrid, España. 2011.
- García, S., «Averías habituales en plantas de cogeneración: turbinas de vapor» Renovetec. Madrid, 2010.
- Gómez E. y Estefania A. “Wind turbine reliability: A comprehensive review towards effective condition monitoring development”. Renewable Energy Research Institute (IER), Spain 2018
- Goloshumova, V. y Brodov, Y. «The thermo stressed state of steam turbine rotors, during startup» Moscow, 2016.
- Gómez Á. “Análisis y pronóstico de fallas en mantenimiento”, Congreso Internacional de Mantenimiento, 4 y 5 de diciembre de 2006, Bogotá, Colombia
- Glen W. “Introducción al análisis de vibraciones” Azima. DLI. [www.AzimaDLI.com](http://www.AzimaDLI.com) 2010
- Grand, A y Adriana, A. “Diseño de un sistema de gestión de mantenimiento preventivo en la unidad de planificación y programación en la empresa CADAFE: Planta Centro”. Caracas, Venezuela. 2001
- Hansi Chen, “Anomaly detection and critical SCADA parameters identification for wind turbines based on LSTM-AE neural network”, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China 2021
- Hernán L. A. “Análisis de fallos en turbinas de vapor: causas, mecanismos y prevención”. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Grupo de Máquinas y Motores Térmicos. Dpto. de Ingeniería Energética. Universidad de Sevilla, Sevilla, España 2018.

- Hernández, H. A., Profesor Titular, “Conceptos de probabilidad y estadística en análisis de fallos de componentes mecánicos”. Dpto. de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de México, 2010.
- Hernández Sampieri Roberto, Fernández Collado Carlos y Batista Lucio Pilar “Metodología de la investigación” México, Mc Graw Hill. 2006
- Hoang Pham “Handbook of Reliability Engineering” ISBN 1-85233-453-3. 696 pag. British Library Cataloguing in Publication Data. 2003
- Hogan Tomas P. “Pruebas psicológicas” México, El Manual moderno. 2004
- Hongshan Zhao, “Anomaly detection and fault analysis of wind turbine components based on deep learning network”, Department of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, 071003, Baoding, China 2018
- Hu, J.S., Wang, B.L. “Crack growth behavior and thermal shock resistance of ceramic sandwich structures with an auxetic honeycomb core”. Journal Composite structures. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113256>.
- Imayer V. M. “Influence of forging and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of heavily alloyed ingot, metallurgy nickel based superalloy” Institut for metals super plastic problems of Russian academy of sciences. Metal alloy 2020.
- Incropera, «Fundamentals of heat and mass transfer». 2000
- Isaías, J. “Resistencia de materiales. Estudio del caso: degradación del acero ASTM A36, sometido al fenómeno de termofluencia”. Ingeniería mecánica 2017
- Keith M. “Maintenance Fundamentals” 2004. 2th edition. Elsevier. Plan engineering maintenance serie. ISBN: 0-7506-7798-8
- Keith M. “Maintenance Engineering handbook” 2008. 7th edition. McGraw Hill eBook. Plan engineering maintenance serie. DOI: 10.1036/0071546464
- Khan, M. S. y Sasikumar, C. “Failure analysis of AISI 420 steel turbine blade operating at low pressure, Materials Today: Proceeding, 66, 3804-3808. DOI: <https://doi.org/10.1016.j.matpr.2022.06.197>.
- Knezevic, J. “Condition Parameter Based Approach to Calculation of Reliability Characteristics”. Reliability Engineering, Vol.19, Nº 1, Elsevier Applied Science, 1987
- Knezevic, J. “MANTENIBILIDAD”, Ingeniería de sistemas. Isdefe, Madrid, España 1996
- Knezevic, J. “Mantenimiento”, Ingeniería de sistemas. Isdefe, Madrid, España 1996

- Kritsov, V. "A Monte Carlo Approach to Modeling and Estimation of the Generalized Renewal Process in Repairable System Reliability Analysis". Dissertation For The Degree of Doctor of Philosophy, University of Maryland, 2000
- Kuznetsov M., «Research of technological possibility of increasing erosion resistance rotor blade using laser cladding,» Elsevier, Saint Petersburg, 2019.
- Latcovich, J. et. at, 2005. "Maintenance and Overhaul of Steam Turbines". Informe de la International Association of Engineering Insurers, 38th Annual Conference, Moscow 2005
- Leyzerovich, A. "Steam turbines for modern fossil fuel power plants" ISBN 0-88173-548-5, USA 2008
- Li, D. W., Liu, J.X., Sun, Y. T., Huang, W. Q., Li, N., y Yang, L. H., "Microstructure and mechanical degradation of K403 Ni-based superalloy from ultra long-term service turbine blade. Journal of Alloys and Compounds, 957, 170378. DOI: [https://doi.org/10.1016.j.jallcom.2023.170378](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170378).
- Lifetime Reliability. "Video conferencias". [en línea] Disponible en web: <http://www.Reliabilityweb.com> Consulta: noviembre 2021
- Liuyang S. "Automatic signal quality check and equipment condition surveillance based on trivalent logic diagnosis theory". School of Mechanical & Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, 2019
- Lyonnet P. "Maintenance planning. Methods and mathematics" Lecturer in Mechanical Engineering. Univerity Institute of Technology, St Denis, France. Springer Science business media. ISBN 978-94-011-3138-4 (ebook). 1991
- Manson S., «Behavior of materials under conditions of thermal stress» Cleveland, 1953.
- Martínez, L. E. Aplicación de la Metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad para el Desarrollo de Planes de Mantenimiento, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Guayaquil, Ecuador 2018
- Mckinsey & Company, Otimizando custos de manutenção através de estratégias, Portugal, 1994
- Meeker, W. Escobar L. A., "Statistical Methods for Reliability Data". Jhon Wiley & Sons, New York, 1998
- MINDUS. Resoluciones 66 y 67. GOC-2021-738-086. 2021
- Modarres, M. Kaminsky, M. Kritsov, V. "Reliability Engineering and Risk Analysis". Marcel Dekker, New York, 1999

- Mohali G., “Confiabilidad estructural y políticas de mantenimiento a la subestación eléctrica Yaritagua 115/13,8 kv”, Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Venezuela 2010
- Mohammadreza T. “Performance based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: A review”. Department of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Petronas, Malaysia, 2017
- Mora L. A. Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios, ISBN 958-33-8218-3. Medellín, Colombia 2008
- Moroz L., «Steam Turbine Thermal Stress Online Monitoring Technology» 17th EPRI Steam Turbine Generator Workshop, Turbine Generator Users Group Meeting & Vendor Exhibition, Pittsburgh, 2017.
- Moubray, J. “Mantenimiento centrado en confiabilidad”, edición en español, publicado por Aladon Ltd, United Kingdom 2000.
- Muñoz, E. “Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente en acero basado en confiabilidad estructural”. Pontificia Universidad Javeriana. Colombia 2008
- Nachlas J., “Fiabilidad”, 4ª ed. Depósito legal M-1995. Isdefe Ingeniería de Sistemas, 220 p. ISBN: 84-89338-07-8 Madrid 1995.
- Nicholas, J. Data farming: una forma de maximizer el uso de datos para el monitoreo del estado de la maquinaria. 2019
- Norma ISO 10816 “Vibraciones mecánicas. Evaluación de las vibraciones en máquinas a través de mediciones en partes no-rotatorias”. Oficina Nacional de normalización. 2004
- Norma ISO 7919 “Vibraciones mecánicas en máquinas no reciprocantes. Mediciones sobre ejes y criterios de evaluación”. Oficina Nacional de normalización. 2006
- Palomino M. Evelio. “Elementos de Medición y Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotatorias” 2012. ISBN 978-959-07-1855-7. Edi. Feliz Valera. Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento. ISJAE. Habana. Cuba.
- Palomino M. Evelio. “Monitorado y Predicción. Actualidad industrial” 2003. Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento. ISJAE. Habana. Cuba. ISBN 978 959 261 369 5.
- PCC “Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución”, [www.granma.cu](http://www.granma.cu), 2017

- Pérez, R. García, O. Camaraza, Y. “Development of expression for resistance to erosion by solid particles in turbine blades” *Ciencia, Tecnología y future*. Vol. 13, Num 1. ECOPETROL 2023
- Pérez, R. García, O. Camaraza, Y. “Desarrollo de expresión para la resistencia al fallo por choque térmico en turbinas de vapor” *Ingeniería energética*. SSN 1815-5901. Universidad Tecnológica de la Habana. CUJAE. 2024, 45(3): e2418.
- Pinca, C. «The current stage of the research about the thermal shock inside the warm rolling cylinders» Oradea University, Oradea, 2008.
- Pino J. et. at, «Importancia para el mantenimiento de elementos mecánicos y fallos en turbinas de vapor. Análisis de histórico» vol. 38, nº 2, 2017.
- Poveda A y Martínez E. “Aplicación de la Metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad para el Desarrollo de Planes de Mantenimiento”, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil, Ecuador 2011
- Process for analysis of Repairable Systems with limited failure experience – Reliability Engineering and System Safety Analysis Journal – ELSVIER – USA 2002
- Raask, E. «Particle impaction erosion in coal-fired boiler plant» 1977.
- Reshetnyak, H. «Mechanical properties of hard metals and their erosive wear resistance» Tallin, Estonia, 1995.
- Rezinskij V. F. y otros profesores de la Universidad energética de Moscú “Alargamiento de la vida útil de turbinas, con numerosas horas de servicio” Moscú, Rusia. 2006. En ruso
- Ritapure, P.P. “Study of mechanical properties and erosion wear behavior of novel Al-25Zn alloy, SiC, Graphite hybrid composite” Elsevier, Maharashtra, India, 2019
- Robert B. “Fundamentos del análisis de Weibull”, Abernethy, FL, USA 2011
- Rodríguez, T. “El Mantenimiento con enfoque a Producción más limpia”. Tesis doctoral. Cuba. UMCC. 2005
- Romero, A. “Condition monitoring of a wind turbine drive train based on its power” dependant vibrations, NSIRC, Cambridge, Cambridgeshire, United Kingdom, 2018
- Rusin, A. «Selecting optimal conditions for the turbine warm and hot start-up» Elsevier, Gliwice, Poland, 2021
- Sabau, A. S. «Prediction of oxide scale exfoliation in steam tubes» Baltimore, 2014

- Sáenz, L. A. “Fundamentos de Creep- Fatigue”. Publicaciones científicas. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. ISBN 978-9942-745-16-1. Ecuador 2020.  
[www.espe.edu.ec](http://www.espe.edu.ec)
- Saiz de Bustamante, A. “Fiabilidad estructural”, Universidad Politécnica de Madrid, España 2010
- San Martín, C. “Aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad a turbinas de vapor de una fábrica de etanol”. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú. 2018
- Sánchez R., “Análisis de confiabilidad de una planta de fuerza”, IX Congreso internacional en innovación y desarrollo, Mexico 2011,
- Sandor, R. et al. “Ensayos de fluencia lenta en el acero inoxidable X6CrNi1811 (1.4948) Junta de Energía Nuclear. Madrid 1982
- Santana, E. “Desempeño del Mantenimiento basado en criterios de Confiabilidad y Mantenibilidad” Brazil. Abraman. 2004
- Sarah Odofin, “Robust fault estimation for wind turbine energy via hybrid systems”, Innovation Institute, College of Engineering and Technology, University of Derby, Derby, UK 2018
- Sarraf, A. “Vibration-based damage detection in wind turbine blades using Phase-based Motion Estimation and motion magnification”. Department of Mechanical Engineering, University of Massachusetts Lowell, USA 2018
- Thorndike Robert L. y Hagen Elizabeth “Test y técnicas de medición” en psicología y educación, Mexico, Trillas. 1978
- Toro J.C “Metodología para medir la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en mantenimiento”. Universidad EAFIT, Medellín, Colombia 2010
- Vladimir D. “Condition monitoring and fault diagnosis” Department of Applied Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, University of Zilina, Slovak rep. 2017.
- Vojnovich, T. at et “Desing of refractories for resistance to high temperature erosion-corrosion” 1977
- Wang Z. “Wind turbine condition monitoring based on a novel multivariate state estimation technique”, School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, China 2021

- Wang, Z. “Critical flow velocity phenomenon in erosion-corrosion of pipelines”, Elsevier, Shenyang, China 2021
- Wang Z. “Wind turbine condition monitoring based on a novel multivariate state estimation technique”, School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, China 2021.
- Winterton, R.H.S. “Where did the Dittus and Boelter equation come from?” School of manufacturing and mechanical engineering. University of Birmingham, UK. Technical notes. Introduction to the heat mass transfer. Vol. 41. Pp 809-810.
- Wright, I. y Dooley, R. «Steam side scale morphologies associated with scale exfoliation from ferritic steel T22» 2011.
- Yañez, M. Gómez de la Vega, H. Valbuena G. “Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo” – ISBN 980-12-0116-9 - Junio 2003
- Yañez, M. Joglar, F. - Modarres M. “Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience”. Reliability Engineering and System Safety Analysis Journal. ELSVIER. USA 2002
- Yañez, M. y Perdomo, J. “Ingeniería de la Confiabilidad, Pilar fundamental del Mantenimiento”. León, México. Congreso mexicano de confiabilidad y mantenimiento Reliability and Management SA. 2003
- Yanghai Tan. “A comparative investigation of data-driven approaches based on one-class classifiers for condition monitoring of marine machinery system”, College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China 2020
- Zheng-Ming H. “Feileru analysis” Tongji University, ISBN 978-1-83968-254-4. 2019 178 páginas. [www.intechopen.com/books/7369](http://www.intechopen.com/books/7369)

# ANEXOS

## Anexo 1. Principales datos sobre las propiedades del metal de los componentes de la turbina y base de datos de operación.

### Propiedades del material del rotor y parámetros de operación

Propiedades del material del rotor

Acero: Cr-Mo-V

Módulo de elasticidad  $E = 160 \text{ GPa}$

Coefficiente de dilatación térmica  $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$

Densidad  $\rho_a = 7.8 \text{ g/cm}^3$

Coefficiente de Poisson  $\mu = 0.3$

Límite de fluencia  $\sigma_{0.2}, \sigma_f = 240 \text{ MPa}$

Capacidad calorífica  $C_p = 680 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

Temperatura de trabajo  $T = 800 \text{ K } (530 \text{ } ^\circ\text{C})$

Radio de los álabes  $r = 1.5 \text{ m}$

Diámetro del eje  $d = 0.550 \text{ m}$

Coefficiente de transferencia de calor por conducción  $k = 35 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$

Humedad del vapor  $y_1 = 0.05$

Diámetro del tubo  $D_{\text{ext}} = 450 \text{ mm}$

Espesor del tubo  $e = 70 \text{ mm}$

Diámetro interior del tubo  $D_{\text{int}} = 310 \text{ mm}$

Área de la sección del tubo  $S = 3.02 \times 10^5 \text{ mm}^2 = 0.302 \text{ m}^2$

Densidad del vapor:  $\rho_{1\text{atm}} = 0.274 \text{ kg/m}^3, \rho_{160\text{atm}} = 43.84 \text{ kg/m}^3$

Flujo del vapor  $F_v = 980 \text{ t/h} = 272 \text{ kg/s} = 6.21 \text{ m}^3/\text{s}$



Velocidad del vapor  $V = F_v/S = 6.21 \text{ (m}^3/\text{s)} / 0.302 \text{ (m}^2) = 20.56 \text{ m/s}$ .

Densidad de los óxidos  $\rho_o \approx 5000 \text{ kgm}^{-3}$

Para la oxidación del A213T22 en vapor de agua

Constante de los gases  $R = 8.3144 \text{ J/mol K}$

Presión  $P = 160 \text{ bar} = 16 \text{ MPa}$

Constante de Arrhenius  $A = 6.22 \times 10^{20} \text{ } \mu\text{m}^2/\text{h}$

Energía de activación  $E_{ox} = -326 \times 10^3 \text{ J/mol}$

Densidad de los óxidos  $\rho_{ox} = 5.08 \text{ g/cm}^3$

Dureza Vicker  $H_v = 250 \text{ HV}$

Tiempo  $t$  en horas

$Pr = 1$

1GEV007CE	1FSRFTB504	1FSRTE502C	1FRSTE503A	1FSRPT501	1FSRPT504	1FRSPT526
POTENCIA ACTIVA	FLUJO VAP SOB CALD CUERPO AP TURB	TEMP VAPOR SOB RECALENTADO DESPUES ATEMPERADOR IZQ	TEMP VAPOR RECALENTADO SALIDA CALDERA	PRES DOMO	PRES VAPOR SOB RECAL A TURBINA	PRES VAPOR ENTRADA RECALENTADOR
MW	t/h	°C	°C	bar	bar	bar
266.02	783.11	401.65	537.97	173.18	165.84	29.59
266.44	784.55	403.35	535.89	173.15	165.81	29.64
266.42	784.00	401.67	538.51	173.42	166.09	29.63
266.04	784.29	402.89	535.36	173.03	165.70	29.63
267.59	786.36	401.83	538.61	173.78	166.48	29.76
266.14	782.07	402.33	535.14	172.60	165.28	29.51
271.79	788.12	402.55	538.88	174.16	166.80	30.32
268.81	781.82	401.99	535.18	172.64	165.34	30.00
272.11	788.41	402.74	538.14	174.10	166.71	30.38
268.80	780.77	401.77	536.11	172.63	165.32	29.99
270.98	787.62	403.05	537.38	173.84	166.52	30.35
268.25	781.80	401.78	536.98	172.91	165.62	30.03
270.00	785.96	403.27	536.49	173.46	166.13	30.27
269.24	782.57	401.77	538.24	173.22	165.96	30.13
270.39	785.07	403.18	535.45	173.22	165.90	30.21
271.01	784.66	401.76	538.12	173.59	166.26	30.25
269.99	783.37	402.77	535.38	172.98	165.63	30.18
271.52	786.09	401.80	538.33	173.81	166.51	30.32
266.42	781.05	402.09	535.77	172.65	165.30	30.06
266.99	786.98	402.76	538.25	173.82	166.44	30.36
263.56	774.38	401.19	536.23	171.45	164.26	29.75

## Anexo 2. Metodología de Weibull para determinar la Confiabilidad.

En el gráfico de Weibull, se pueden hacer estimaciones de probabilidades utilizando la línea recta, o simplemente leyendo la probabilidad en la escala vertical, para un dato.

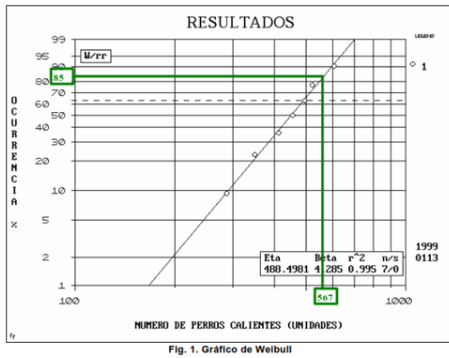


Figura 6. Papel de Weibull para determinar la probabilidad

La pendiente de la línea recta que pasa por la mayoría de los puntos en el gráfico de Weibull, es el factor de forma  $\beta$ . Este  $\beta$  indica el tipo de distribución de probabilidad (normal, exponencial, u otra). La vida característica  $\eta$  es el valor del dato, que corresponde al 63.2% del valor del rango medio de la línea recta. Este 63.2% es realmente  $1 - 1/e$ , dado  $t_0 = 0$  y  $t = \eta$ .

## Anexo 3. Análisis multivariante

Fundamentación del modelo de análisis de componentes principales (ACP) De La Torre, Francisco. “Control Estadístico Multivariante de Proceso, una perspectiva del Monitoreo de la Condición de Turbinas”. Cuba. CUJAE. CEIM. 2005.

Dada la gran cantidad de variables consideradas síntomas del comportamiento de la turbina, se hace difícil visualizar las relaciones existentes entre las variables, además de las correlaciones entre ellas. Pueden ser encontradas variables cuyo aporte sea insignificante, o que varias de ellas aporten la misma información. Por lo tanto, es necesario determinar las variables, que mayor información útil aportan, relacionando este concepto con la variabilidad o varianza de los valores medidos de las variables y no con la mayor cantidad de variables. Durante el monitoreo de las variables de proceso, se producirán variaciones de los datos, que son inevitables, sin embargo, se considera que las propiedades de las variaciones de los datos sean repetibles para las mismas condiciones de operación.

El análisis de componentes principales (ACP) clásico es un método descriptivo basado en una descomposición ortogonal de la matriz de covarianza de las variables, a lo largo de la dirección, que señala la máxima variación de los datos. El principal propósito del uso del ACP es reducir la dimensión de los datos, es decir encontrar factores (CP) no correlacionados entre sí, cuya selección adecuada, aporte menor dimensión, que el grupo de datos originales. Estos factores tienen la propiedad de describir la mejor tendencia del grupo de datos originales, que incluye los factores y sus combinaciones lineales. Por consiguiente, los CP permiten definir las variables que tienen mayor peso en la variación del comportamiento de la turbina. La mayor limitación de este método, es que es invariable en el tiempo, cuando la mayoría de las variables controladas sí lo son. En el estado estable estacionario de funcionamiento, las características de variación de los valores medidos, estarán relacionados con las condiciones de explotación de la máquina, con la edad, con la calidad de los mantenimientos y con la calidad del diseño y fabricación de los componentes. El modelo ACP debe ser actualizado periódicamente, incluyendo el recálculo de la media, la covarianza y los CP.

La aplicación de la teoría estadística al monitoreo de procesos ayuda a la suposición de que las características de la variación de los datos son relativamente invariables, a menos que ocurra un fallo en el sistema, es decir que se produzca una condición anormal. Esto implica, que las propiedades de las variaciones de los datos, tales como la media y la varianza, son repetibles para las mismas condiciones de operación, aunque los valores actuales pudieran no ser previsibles. La repetitividad de las propiedades estadísticas permite determinar umbrales límites para el control de las mediciones de las variables, por lo que puede ser determinada la condición anormal de funcionamiento.

La conformación de un programa de monitoreo de proceso a partir del MSPC infiere que cuando no es conocida la media " $\mu$ " ni la covarianza " $\Sigma$ " de la población de datos, entonces puede ser planteada una cuantificación cuadrática capaz de resumir en un escalar la información proveniente de diferentes variables correlacionadas, de tal manera, que este escalar resuma de forma integral las características de centrado y variabilidad del proceso, sustituyendo a la distribución " $\chi^2$ " por el empleo del estadístico  $T^2$  de Hotelling para la construcción de la gráfica de control tipo Shewhart para MSPC.

El límite de control superior (LCS) asume que las observaciones en un instante de tiempo son estadísticamente independientes de las observaciones en otro instante. Si se han tomado

suficientes datos, como para capturar las variaciones del proceso normal, el estadístico  $T^2$  de Hotelling puede ser una herramienta efectiva para el proceso de monitoreo, aun si existe una leve desviación desde la normalidad o con independencia de la suposición estadística. En la figura se muestra la gráfica de control tipo Shewhart para el control multivariable empleando el estadístico  $T^2$  de Hotelling, donde se grafican los valores  $T^2_i$  con único LCS ( $T^2_\alpha$ ), para un nivel de significación dado. Se producirá la alarma (condición anormal de funcionamiento), cuando  $T^2_i > T^2_\alpha$ . El límite de control inferior (LCI) también puede ser obtenido para  $T^2$  de Hotelling, para lo cual existen rigurosas formulaciones estadísticas y varias extensiones estadísticas, que no son estudiadas usualmente en la literatura de control de procesos. El LCI es generalmente utilizado para detectar cambios en la matriz covarianza. Aunque el LCS es utilizado para detectar cambios en la media, también puede detectar cambios en la covarianza.

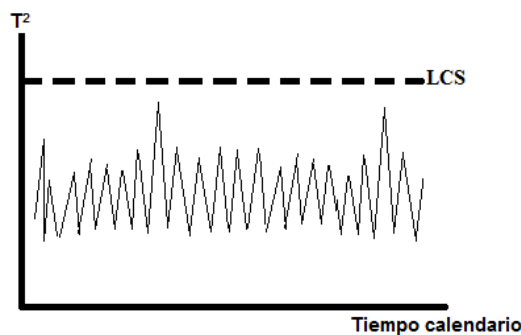


Figura 7. Gráfico de seguimiento del estadístico  $T^2$  de Hotelling contra el valor de referencia (LCS)

#### Anexo 4. Cálculo de confiabilidad de sistemas (Estructuras básicas)

Se reconoce en general, que existen varios tipos genéricos de relaciones estructurales entre un dispositivo y sus componentes. Estos son: en serie; en paralelo; k-de-n y otras.

Definición: Un sistema en serie es aquel en el que todos los componentes deben funcionar adecuadamente para que funcione el sistema. Claramente, la analogía conceptual a la estructura serie es un circuito eléctrico de tipo serie.

Sin embargo, a diferencia de un circuito serie, esto no implica específicamente, que los componentes deban estar conectados físicamente en secuencia. Más bien, lo importante es que funcionen todos los componentes. Un ejemplo de sistema serie en el que los componentes no están

físicamente conectados es el conjunto de neumáticos de un automóvil. Para tres componentes, éste se muestra en la siguiente Figura.



Figura. Sistema en serie

En general, se llaman diagramas de bloques a las representaciones de estructuras de sistemas como las de la Figura anterior. Muchas veces son útiles a la hora de comprender las relaciones entre componentes. En la estructura serie, la necesidad de que todos los componentes funcionen para que el sistema lo haga, implica que  $\varphi(x)=1$  si  $x_i=1 \forall i$ , y 0 de otro modo. Una forma algebraica lógica para esta condición es definir la función de estructura del sistema como:

$$\varphi(x) = \prod_{i=1}^n x_i$$

Nótese que una forma igualmente correcta, pero a veces menos útil es:

$$\varphi(x) = \min_i x_i$$

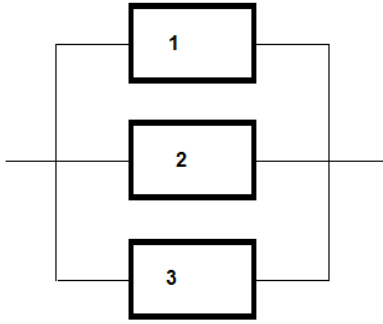
Sólo el funcionamiento de todos los componentes hace que el sistema lo haga.

De la expresión anterior, se concluye que la confiabilidad del sistema es el producto de las confiabilidades individuales de sus componentes (Gómez A. 2006).

$$C_s = C_1 * C_2 * C_3 * \dots * C_n$$

El segundo tipo de estructura es la paralela. La analogía conceptual es de nuevo el circuito eléctrico correspondiente y la definición es:

Definición 2.2. Un sistema paralelo es aquel en que el funcionamiento de cualquiera de los componentes, implica el del sistema. De nuevo se subraya que no se implica ninguna conexión física entre los componentes, por la definición o por el diagrama de bloques. El diagrama de bloques para un sistema paralelo de tres componentes es el mostrado en la Figura 2.2.



Figura, Sistema en paralelo

Un ejemplo de un sistema paralelo es el conjunto de dos motores en un avión bimotor. Mientras que funcione al menos un motor, el vuelo se mantiene. Para el sistema paralelo se puede definir la función de estructura de modo similar al sistema serie:

$$\varphi(x) = \max_i x_i$$

Se puede definir una forma alternativa más susceptible a la manipulación analítica, por medio de una notación concisa desarrollada por Barlow y Proschan. Conceptualmente, un sistema paralelo falla cuando todos sus componentes fallan, y el sistema funciona cuando se produce el complemento de «todos los componentes fallan». Por tanto, para el sistema paralelo:

$$\varphi(x) = \prod_{i=1}^n x_i$$

Donde definimos esta notación como:

$$\prod_{i=1}^n x_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i)$$

Nos referimos al P (pi) invertido como a «ip». Cuando se domina, esta notación es muy útil.

Según la definición anterior, la confiabilidad de un sistema en paralelo está dada por:

$$C_s = 1 - (1 - C_1)(1 - C_2)(1 - C_3) \dots (1 - C_n)$$

Para un sistema en serie, la confiabilidad se calcula como el producto de la confiabilidad de cada uno de sus componentes. Esta es la razón por la que se puede afirmar, que la confiabilidad de la

máquina es menor que la confiabilidad de su elemento menos confiable. (Mohali, G. 2010) (Sánchez R. 2011)

Se entiende por sistema redundante, aquel que permanece en stand by (reserva) con el propósito de garantizar la operación normal del proceso. En la realidad, sistemas completos en reserva son poco comunes, por el costo que ello implica. Un ejemplo de ello lo constituye una planta donde se producen químicos letales para el ambiente y la vida en general. En este tipo de plantas se hace obligatorio tener un sistema de control de emisiones al ambiente en reserva por las implicaciones que se derivan de la emisión al ambiente de estos químicos. Lo que sí es común, es tener equipos de reserva para garantizar la normal operación del proceso.

Citando a Lourival Tavares un sistema redundante se puede definir como:

“Cualquier elemento que tenga por un período el 100% de confiabilidad hace “1” a toda la ecuación. Ocurrida la falla, si la conmutación es inmediata, la confiabilidad se mantendrá en el 100% hasta la siguiente falla de este elemento”.

## **Anexo 5. Monitoreo de la condición en planta de generación de electricidad**

Según Amin (Worley P., 2016) las centrales modernas dependen en gran medida de las máquinas rotativas, tales como las turbinas de vapor, turbinas de gas, generadores eléctricos, bombas, motores, compresores y ventiladores. Para maximizar el beneficio de la planta de energía, las máquinas rotativas se deben hacer funcionar con la máxima confiabilidad, máxima capacidad, eficiencia y con los mínimos costos de operación y mantenimiento.

El monitoreo eficaz y la elevada confiabilidad, comienzan desde la fase de diseño básico, sobre todo con las especificaciones de las máquinas rotatorias, y el diseño básico del tren de generación de energía. Unas especificaciones inadecuadas impactan negativamente en la confiabilidad de la generación de energía. Una aclaración correcta en la fase de licitación (particularmente una exhaustiva evaluación de las ofertas, antes de la selección del proveedor) establece una base eficaz de confiabilidad para la máquina. (Liuyang S. 2019).

Para el análisis de la confiabilidad, así como la solución de fallos, se deben considerar todos los factores, en particular los cambios en las condiciones de operación, los cambios y modificaciones del equipo y su montaje. Las máquinas deberían considerarse como un sistema completo, incluido el sistema de transmisión y el acoplamiento y la participación de los equipos auxiliares tales como



el reductor (si procede), el sistema de lubricación, el sistema de enfriamiento (si lo hay) y el sistema de sellos.

El monitoreo del estado se basa en el análisis de las tendencias, para lo cual se requiere que se utilicen sensores adecuados para monitorear los parámetros indicados, determinar la línea de base (condición normal), y dar seguimiento a la tendencia de los datos capturados para identificar los cambios en la condición de la máquina (Ajay K., 2018). Un monitoreo efectivo de la condición requiere, que se identifiquen todas las condiciones anormales a través de comparaciones con las condiciones normales o de línea base. Pero no es posible para todos y cada uno de los componentes de un tren de máquina complejo. (Vladimir D., 2017), (Romero A., 2018)

Es importante obtener información de referencia tan pronto como sea posible, después del arranque inicial. Generalmente son ignoradas las condiciones de base en los proyectos y esto afecta negativamente al monitoreo del estado. Sin línea base, no hay ningún punto de referencia para comparar e interpretar los datos. (Gómez L., Artigao E., 2018)

Con las prácticas actuales de mantenimiento y solución de problemas, la mayoría de los fallos se deben a que no se considera el sistema como un todo. La definición del sistema completo es un paso muy importante para garantizar el éxito del programa de monitoreo de la condición.

Las principales causas de los problemas y fallos incluyen:

- Los cambios en las condiciones de operación, incluyendo cambios en el procedimiento de operación y la preparación del operador.
- Los problemas de instalación y puesta en marcha.
- Los problemas de diseño, fabricación y montaje.
- El desgaste y envejecimiento de la máquina.
- La confiabilidad de los componentes de la máquina está directamente relacionada con la confiabilidad de los sistemas auxiliares. En muchos casos, la causa raíz del fallo de un componente se encuentra en el sistema auxiliar de apoyo. Por lo general, el fallo de la máquina o de un componente en particular se produce porque el equipo se somete a condiciones, que exceden los valores de diseño.

- La mayoría de los daños y el desgaste de la maquinaria pueden ocurrir durante condiciones transitorias, como la puesta en marcha o condiciones de parada. Durante este tiempo, el equipo está sujeto a un rápido cambio de la temperatura, la presión y la velocidad. En muchos casos, la causa raíz de los daños mecánicos de la máquina rotatoria, es que la potencia requerida por el sistema supera la capacidad de la máquina.
- Con base en la experiencia, la causa raíz del fallo es un cambio en las condiciones de funcionamiento. Un segundo mecanismo de fallo, son cuestiones relacionadas con la instalación y puesta en servicio. Los problemas del diseño o de la fabricación (incluidos los errores de ingeniería, los problemas de materiales, defectos de fabricación) son la tercera fuente de fallos y averías, a pesar de que los problemas de diseño, por lo general, aparecen poco después de la puesta en marcha (mortalidad infantil). Existen casos excepcionales, en los que los problemas de diseño se manifiestan después de un tiempo de funcionamiento prolongado. Sin embargo, la causa principal del problema de diseño es que el componente no está diseñado para condiciones de funcionamiento real. El desgaste prematuro de los componentes, a menudo es el efecto y no la causa. El desgaste de cojinetes, juntas, anillos y otros similares, son por lo general debido a que operan bajo una condición diferente a la del diseño. Un ejemplo particular son los rodamientos, que a menudo sufren problemas de montaje o instalación.
- Los nuevos métodos de modelado, técnicas avanzadas de simulación y cálculos numéricos juegan un papel importante en la solución de problemas y el análisis de la causa raíz. Frecuentemente se informa el roce del rotor de la turbina de vapor con la carcasa. Se requieren simulaciones realistas de expansión dinámica y térmica del rotor y la carcasa interior para un análisis de las causas de este tipo de casos. Para muchos problemas de confiabilidad, es necesario realizar un análisis preciso de elementos finitos (FEA) de la máquina, para encontrar la verdadera causa raíz.

A partir del análisis anterior, se pueden identificar varias conclusiones sobre el mantenimiento y la revisión de turbinas de vapor:

1. A pesar de las diferencias sustanciales en el diseño, la complejidad, la aplicación, los parámetros del vapor, y el tamaño, en lo fundamental todas las turbinas de vapor son las mismas.

Elas realizan la misma función, utilizan componentes principales y sistemas de apoyo similares, y están sometidas a los mismos mecanismos de fallo. En consecuencia, se espera, que los objetivos del mantenimiento y las revisiones programadas de los componentes principales, para lograr altos niveles de confiabilidad y disponibilidad deben ser similares.

2. Los requisitos de mantenimiento programados, recomendados para turbinas de vapor son bastante similares para todas las tecnologías.
3. Existen diferentes enfoques para establecer intervalos de tiempo más largos entre las principales paradas de reacondicionamiento general. Estos incluyen los intervalos del proceso y la criticidad de las máquinas impulsadas, recomendaciones de los fabricantes de turbinas, normas de grupos, metodologías basadas en el riesgo, metodologías centradas en confiabilidad, y basadas en la condición.
4. Las exposiciones a riesgos inherentes están aumentando, y es necesario que haya una vigilancia continua en relación con el control de la confiabilidad y la disponibilidad de estas nuevas unidades y en consecuencia ajustar sus intervalos de mantenimiento.

En resumen, lo que es importante para las aseguradoras es que las tareas de mantenimiento y sus frecuencias deben priorizarse hacia las partes de la turbina de vapor, que tienen el riesgo más alto (mayor probabilidad y consecuencia del fallo).

Para los metales, se consideran los mecanismos de fallos siguientes:

Mecanismos de fallo inducidos por esfuerzos	Mecanismos de fallo por decrecimiento de la resistencia	Mecanismos de fallo por aumento de los esfuerzos
---	---	--

Fractura frágil	Desgastes	Fatiga
Buckling	Corrosión	Radiación
Fluencia	Agrietamiento	Choque térmico
Impacto	Difusión	Impacto
Fractura dúctil	Fluencia	Fretting
Deformación elástica	Fragilización	
	Fretting	

## Anexo 6. Cálculo de coeficientes para fatiga térmica

Coeficiente por acabado superficial,  $C_a$

Mientras que la probeta de ensayo que se usa para obtener las curvas S-N dispone de un pulido especular de su superficie, la de cualquier pieza en general presentará normalmente una rugosidad mayor. Esta sensibilidad a la rugosidad superficial será mayor cuanto mayor sea la resistencia del material.

Para un valor de la resistencia última a tracción del acero  $\sigma_m = 690 \text{ MPa}$  y un acabado de superficie maquinado de la pieza, resulta un coeficiente corrector de:  $C_a = 0,75$

Coeficiente por tamaño,  $C_b$

Para piezas circulares, en los casos de flexión y torsión, el coeficiente por tamaño ( $C_b$ ) se puede expresar como:

$$C_b = 1 \quad \text{si } d < 10 \text{ mm}$$

$$C_b = 1,189 \cdot d^{-0,097} \quad \text{si } d > 10 \text{ mm}$$

Para casos de carga axial:  $C_b = 1 \quad \text{si } d < 10 \text{ mm}$

$C_b =$  entre 0,6 - 0,7 si  $d > 10$  mm (según la excentricidad de la carga)

Para casos de flexión y torsión, el coeficiente por tamaño ( $C_b$ ) se calcula utilizando las expresiones vistas, que para un diámetro de eje  $d = 550$  mm ( $d > 10$  mm), resulta:  $C_b = 0,85$

• Coeficiente de confianza o seguridad funcional,  $C_c$

Los autores Stilen, Cummings y Schulte establecieron que la distribución de la relación de las resistencias a la fatiga es una distribución normal para un número fijo de ciclos, y en este sentido, el coeficiente de confianza se puede expresar como:

Coeficiente de confianza,  $C_c = 1 - 0,08 \cdot D$

siendo  $D$  el factor de desviación, que se puede obtener en función de la probabilidad de supervivencia que se desee que tenga la pieza.

Si se considera una probabilidad de fallo del 99%, resulta un factor de desviación de valor  $D = 2,3$ .

Con este valor el coeficiente de confianza resulta finalmente de:  $C_c = 1 - 0,08 \cdot D = 1 - 0,08 \cdot 2,3 = 0,82$

Coeficiente por temperatura,  $C_d$

El coeficiente de temperatura ( $C_d$ ) tiene en cuenta la diferencia de temperatura entre la temperatura de ensayo de la probeta para la obtención del diagrama S-N, y la temperatura real de operación de la pieza.

Esto es debido a que tanto el límite elástico como la resistencia a tracción de los materiales son variables con la temperatura. Así, cuando las temperaturas de operación son bajas se debe comprobar el fallo por fatiga, mientras que si la temperatura es elevada se deberá comprobar el fallo de la pieza por fluencia o por fatiga del material, o por una combinación de ambas conocido como termofluencia.

El coeficiente de temperatura  $C_d$  se puede obtener de las expresiones siguientes:

$$C_d = \frac{620}{460 + T}$$

para  $T > 160$  °F (temperatura expresada en grados Fahrenheit)

$C_d = 1$  para  $T \leq 160$  °F

Se supone que para este ejemplo el eje trabajará siempre a una temperatura de operación de 540 °C (= 1,8xT°C+32 = 1004 °F).

$$C_d = \frac{620}{460 + T} = \frac{620}{460 + 1004} = 0.42$$

Sin embargo, en la presente investigación se calcula Cd para toda la distribución de temperaturas.

- Coeficiente de sensibilidad a la entalla  $C_e$

Como ya hemos visto, un fallo por fatiga casi siempre se origina en una discontinuidad, de manera que en muchas ocasiones la grieta empieza en una entalla, un resalte o en el borde de un orificio, aunque también puede iniciarse en una huella de herramienta o a partir de una raya en la superficie de la pieza. Hay materiales que son mucho más sensibles a la entalla que otros.

Desde un punto de vista físico, el factor de concentración de tensiones elástico ( $K_t$ ), tiene un significado relativo, puesto que los materiales reales suelen presentar un comportamiento de tipo elastoplástico en las entallas.

Por esta razón, la hipótesis de comportamiento elástico lineal es sólo una aproximación inicial que no suele cumplirse del todo en la práctica. Este hecho hace que la presencia de singularidades geométricas reduzca la resistencia a la fatiga de las piezas y demás componentes mecánicos, aunque no en la misma proporción como marca el factor de concentración de tensiones ( $K_t$ ) teórico. Por este motivo se introduce el concepto de coeficiente de concentración de tensiones a la fatiga ( $K_f$ ) definido, para una vida dada, como:

$$K_f = \frac{\text{Resistencia a la fatiga sin entalla}}{\text{Resistencia a la fatiga con entalla}}$$

El coeficiente de sensibilidad a la entalla ( $C_e$ ) está relacionado con el coeficiente de concentración de tensiones a la fatiga ( $K_f$ ) en la siguiente forma:

$$C_e = \frac{1}{K_f}$$

Por otro lado, la relación entre el coeficiente de concentración de tensiones elástico lineal ( $K_t$ ) y el coeficiente de concentración de tensiones a la fatiga ( $K_f$ ), viene dada a través del llamado factor de sensibilidad a la entalla ( $q$ ):

$$q = \frac{1}{1 + a/r}$$

donde

a es una dimensión característica del material

r es el radio de la entalla.

Despejando de la ecuación anterior, se puede obtener el coeficiente de concentración de tensiones a la fatiga ( $K_f$ ) en función del coeficiente de concentración de tensiones elástico ( $K_t$ ) y del factor de sensibilidad a la entalla ( $q$ ):

$$K_f = 1 + q \cdot (K_t - 1)$$

El procedimiento a seguir sería el siguiente:

1º.- Se calcula el coeficiente de concentración de tensiones ( $K_t$ ) a partir de la geometría de la pieza, utilizando los distintos diagramas.

2º.- Posteriormente, con los datos de geometría de la pieza y radio de la entalla, se calcula el factor de sensibilidad a la entalla ( $q$ ) mediante la ecuación ya vista.

3º.- Conocidos  $K_t$  y  $q$ , se calcula el coeficiente de concentración de tensiones a la fatiga ( $K_f$ ) mediante la expresión:

$$K_f = 1 + q \cdot (K_t - 1)$$

4º.- Finalmente, el coeficiente de sensibilidad a la entalla ( $C_e$ ) se calcula como:

$$C_e = 1/K_f$$

Aparte de los anteriores factores, existen otros aspectos a tener en cuenta que podrán modificar el límite de fatiga final de una pieza. Entre otros, están los siguientes:

- Tensiones residuales: si a una pieza se le somete a un tratamiento que introduzca una tensión residual superficial de compresión, como por ejemplo, un proceso de endurecimiento superficial mediante perdigones, martillado o laminado en frío, entonces se obtendrá una mejora del límite de fatiga de la pieza.

- Características direccionales del material: las piezas laminadas, forjadas o estiradas presentan un 10 a 20 % de reducción del límite de fatiga en dirección transversal respecto al valor que presenta en su dirección longitudinal de laminación.
- Defectos internos: inclusiones de escoria u óxidos, partículas extrañas, empeoran el límite a fatiga.
- Corrosión: la corrosión produce un picado de la superficie de la pieza que hace disminuir su resistencia a fatiga.
- Metalizado: procesos como el cromado, niquelado y cadmiado pueden reducir el límite de fatiga de la pieza hasta incluso en un 35%.

A continuación, se calcularán los valores de los distintos coeficientes correctores del límite de fatiga adaptados a la presente investigación:

En primer lugar, se calcula el coeficiente de concentración de tensiones ( $K_t$ ). Para este caso, se empleará el diagrama "Barra circular con entalle circunferencial sometida a flexión", entrando en el diagrama con los siguientes valores:

$$D/d = 550/530 = 1,05$$

$$r/d = 5/550 = 0,009$$

Resultando un coeficiente de concentración de tensiones ( $K_t$ ) de valor:

$$K_t = 1,45$$

En segundo lugar, a partir de la dimensión característica del eje (para este caso, se tiene que  $a =$  diámetro = 550 mm) y radio de la entalla ( $r = 5$  mm), se calcula el factor de sensibilidad a la entalla ( $q$ ), mediante la ecuación:

$$q = \frac{1}{1 + a/r} = \frac{1}{1 + 550/5} = 0,009$$

Conocidos el coeficiente de concentración de tensiones  $K_t=1,45$  y del factor de sensibilidad a la entalla  $q=0,009$ , se calcula el coeficiente de concentración de tensiones a la fatiga ( $K_f$ ) como:

$$K_f = 1 + q \cdot (K_t - 1) = 1 + 0,009 (1,45 - 1)$$



$$K_f = 1,004$$

Finalmente, el coeficiente de sensibilidad a la entalla  $C_e$  se calcula como:

$$C_e = 1/K_f = 1/1,004 = 0,99$$

Por lo tanto, obtenido los coeficientes correctores anteriores, ya se puede obtener el valor de la resistencia a la fatiga ( $\sigma_n$ ):

$$\sigma_n = C_a \cdot C_b \cdot C_c \cdot C_d \cdot C_e \cdot \sigma'_n = 0,75 \cdot 0,85 \cdot 0,82 \cdot 0,42 \cdot 0,99 \cdot 835 = 0,22 \cdot 835 = 190 \text{ MPa}$$

ISO 10816-3		Medium-sized machines		Large machines	
Advisor		Group 2		Group 1	
Velocity		Rated Power			
in/sec eq. Peak	mm/sec RMS	15 kW – 300 kW		300 kW – up	
0.61	11.0	DAMAGE OCCURS			
0.39	7.1				
0.25	4.5	RESTRICTED OPERATION			
0.19	3.5	UNRESTRICTED OPERATION			
0.16	2.8				
0.13	2.3				
0.08	1.4	NEWLY COMMISSIONED MACHINERY			
0.04	0.7				
0.00	0.0				
Foundation		Rigid	Flexible	Rigid	Flexible