

**Título del Proyecto
de Investigación a que corresponde el Reporte Técnico:**

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE GRIETAS EN
ÁLABES DE TURBINAS DE VAPOR**

Tipo de financiamiento

Con financiamiento PRODEP

Autores del reporte técnico:

Dra. Christian Marisol Clemente Mirafuentes

ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE GRIETAS EN ÁLABES DE TURBINAS DE VAPOR

Resumen: El presente estudio propuso determinar las causas para el inicio de grietas en álabes y estimación de vida útil con propagación de grieta en forma experimental y numérica por los efectos de corrosión y fatiga a través del estudio de la mecánica de la fractura y técnicas electroquímicas para la detección de grietas y sus efectos de daños sobre los álabes de las turbinas de vapor. El desarrollo del estudio se centró en dos fases. La primera fue determinar las causas de inicio de las grietas y obtener un tamaño de grieta definido para determinar el número de ciclos restante hasta la falla a través de modelos numéricos y matemáticos usando la teoría de la mecánica de la fractura y análisis de elemento finito FEA. La segunda fase, consistió en determinar el efecto de la corrosión bajo cargas mecánicas, aplicando técnicas electroquímicas para la evaluación del mecanismo de corrosión bajo carga de fatiga en los álabes. Finalmente, estos resultados se utilizaron para establecer un diagnóstico de falla y estimación de vida útil con aplicación en álabes de turbinas de vapor.

Abstract: The present study proposed to determine the causes for the initiation of cracks in blades and to estimate the useful life with crack propagation in an experimental and numerical way due to the effects of corrosion and fatigue through the study of the mechanics of the fracture and electrochemical techniques for the detection of cracks and their effects of damage on the blades of steam turbines. The development of the study focused on two phases. The first was to determine the initiation causes of cracks and obtain a defined crack size to determine the number of cycles remaining until failure through numerical and mathematical models using the theory of fracture mechanics and FEA finite element analysis. The second phase consisted of determining the effect of corrosion under mechanical loads, applying electrochemical techniques to evaluate the corrosion mechanism under fatigue load in the blades. Finally, these results were used to establish a failure diagnosis and useful life estimation applied to steam turbine blades.

Palabras clave: Turbina de vapor, fatiga, corrosión, daño.

Usuarios potenciales

El presente proyecto de investigación tuvo como finalidad aportar el fortalecimiento de las redes de trabajo con investigadores del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, quienes estuvieron colaborando en esta investigación. Sin embargo, desde el punto de vista académico la incidencia de este proyecto ha tenido impacto en los estudiantes del Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, mediante el aprendizaje de la metodología abordada en este proyecto, siendo aplicada y desarrollada para la elaboración de proyectos y tesis. Finalmente, los resultados obtenidos de este proyecto impactarán en el área de investigación para mejorar el diseño de materiales de álabes con el objetivo de minimizar los altos esfuerzos y prolongar la vida útil en las turbinas de vapor.

Reconocimientos

A **PRODEP UACJ-PTC-392** por los recursos otorgados para el desarrollo del proyecto “Análisis Experimental y Numérico de Grietas en Álabes de Turbinas de Vapor”.

A la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (Universidad Autónoma del Estado de Morelos).

Al estudiante Luis Daniel Ramos Tejada de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica.

1. INTRODUCCIÓN

Los álabes de las turbinas de vapor de baja presión o L-0 son componentes críticos en las plantas de energía, convierten la energía cinética del vapor en energía mecánica, son diseñadas para extraer los restos finales de flujo de vapor y como resultado son más susceptibles a la falla que las de alta presión (L-2) y presión intermedia (L-1). Puesto que, los álabes de la última etapa son grandes y el flujo se encuentra a bajas presiones, son

afectados considerablemente por la velocidad de rotación, el flujo del vapor, vibraciones, desbalance, armónico de giro y cargas repetidas de tipo alternante aunado al ambiente agresivo del fluido de trabajo. Por consiguiente, estos mecanismos producen fallas por fracturas en los álabes de la última etapa ocasionando paros inesperados en las plantas de energía por ruptura de componente (Hyojin 2013) (Krishna, et. 2012). Los álabes de baja presión están bajo esfuerzos que fluctúan como se muestra en la figura 1. Estos esfuerzos se componen por los esfuerzos medios, máximos y mínimos. El esfuerzo medio es importante en el daño acumulativo para la fatiga de bajo ciclo (LCF) y crítica para la fatiga de alto ciclo (HCF).

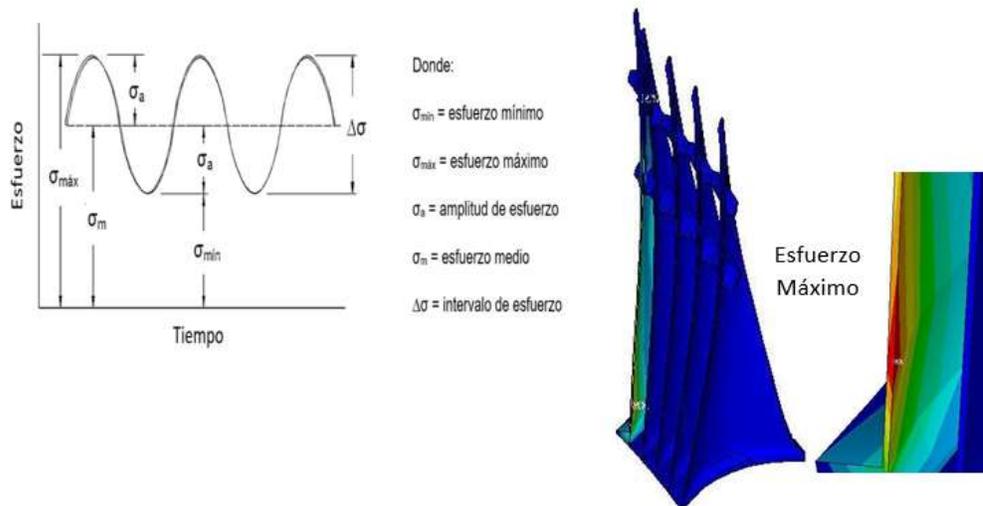


Figura 1. Esfuerzo fluctuante de tipo alternante en álabes (Rodríguez 2014).

Una carga alternativa en fatiga es más dañina cuando se encuentra un esfuerzo medio alto a causa de la velocidad de rotación y las fuerzas del vapor constante (Rodríguez 2014) (Segura 2011). Éste esfuerzo también se conoce como esfuerzo estático. Sin embargo, los esfuerzos máximos y mínimos se conocen como esfuerzos fluctuantes, son el resultado de las cargas que varían con respecto al tiempo dando origen a la falla por fatiga.

Por otro lado, los efectos de la corrosión sobre las turbinas de vapor para la generación de energía producen anualmente pérdidas económicas que en países industrializados llegan a tener un costo en reparaciones cerca de 150 a 250 millones de dólares por año. El costo de producción de pérdidas es casi diez veces más alto que el costo en reparaciones, lo que se traduce a un 15 % de pérdida de generación de energía MW, causada por problemas de corrosión por la acumulación de depósitos de solución en los álabes (González 2014). A causa de estos aspectos en las condiciones de operación en las turbinas, el agrietamiento siempre estará presente en uno o varios álabes.

Por lo tanto, con este estudio se busca estimar el tamaño máximo de una grieta a la que podría seguir trabajando un álabe a través de las técnicas de ruido electroquímico y mecánica de la fractura con elemento finito será posible conocer el comportamiento de la propagación de la grieta, que permitirá aprovechar la vida restante de un álabe y detener la operación de la turbina antes de que el álabe se fracture y así evitar daños a otros álabes o etapas. Este análisis será de gran ayuda en otras turbinas de vapor, puesto que todas trabajan bajo los mismos principios y son afectadas con los mismos factores. La técnica de análisis desarrollada en este proyecto no solo se podrá usar en turbinas de vapor, también será válida para otros tipos de elementos de máquinas sometidos a cargas cíclicas.

2. PLANTEAMIENTO

Desarrollo de una metodología que permita la detección temprana de una grieta en álabes de turbinas de vapor sometida a fatiga mecánica en ambiente corrosivo y su respectiva propagación en el tiempo para estimar la vida útil. Una vez que se desarrolle la metodología de propagación de grieta se obtendrán las bases para un patrón de detección de grieta que permitirá la detección temprana de la misma, lo que permitirá aprovechar la vida restante de un álabe para la estimación de vida útil y diagnósticos de falla.

2.1 ANTECEDENTES

Se han realizado estudios sobre los distintos tipos de materiales empleados en la fabricación de álabes y los tipos de daño que estos pueden sufrir. Otros estudios se han enfocado en la evaluación de predicción de vida para el análisis de fiabilidad de un material bajo condiciones de fatiga y tensión. Con el objetivo de estudiar el crecimiento de grietas en diferentes materiales.

Clark (1974) Realizó ensayos en dos ambientes: aire y NaCl al 3%. El estudio concluyó que la velocidad de crecimiento de grieta es tres veces mayor, cuando el material se expuso a la solución de NaCl. Jonas (1978), investigó los problemas generales de ataque corrosivo de las turbinas de vapor identificando las ubicaciones, componente del material

y las sustancias químicas que conducen a la corrosión. Este estudio reveló que los rotores son susceptibles a las picaduras de corrosión, corrosión bajo tensión y fatiga por corrosión a causa de la concentración de impurezas. Otros investigadores, Syrett y Viswanathan (1982), observaron los efectos de la fatiga por corrosión del acero inoxidable 17-4 PH expuesto a FeCl₃ al 6% y los efectos de la temperatura. Realizaron pruebas mediante ensayos electroquímicos (voltaperometría cíclica) y velocidad de propagación de grieta. Los resultados mostraron mayor susceptibilidad sobre la microestructura del material en fatiga por corrosión y nulo efecto por las picaduras, además de los efectos de la temperatura. Ebara et al. (1990), estudiaron el proceso de corrosión en un acero inoxidable al 12% de

cromo aplicado en los álabes de turbinas de vapor, las pruebas en fatiga fueron llevadas a cabo en diversos ambientes corrosivos. La influencia de las picaduras sobre la resistencia a la fatiga en álabes de turbinas de vapor para un material al 12%Cr fueron investigadas por Zhou y Turnbull (1999); ellos simularon la apariencia general de las picaduras observadas en álabes de servicio. Los resultados fueron mostrados en términos del factor de intensidad de esfuerzos, apoyados por la mecánica de la fractura lineal elástica, relacionando el concepto de grietas cortas con las picaduras. Perkins y Bache (2005), investigaron el comportamiento de fatiga por corrosión de un acero inoxidable martensítico en un entorno de servicio simulado. Las pruebas en fatiga fueron realizadas en agua desionizada a 120°C, cloruro de sodio y aire a 120°C, también se examinaron los efectos de la frecuencia y el efecto de la resistencia a fatiga del material. Concluyendo que la resistencia a la fatiga se ve reducida cuando el material es expuesto en agua desionizada, siendo la reducción mayor en el caso del cloruro de sodio. También encontraron que la falla en entornos que contenían cloruro de sodio producía picaduras por corrosión, aunque, encontraron que la aplicación de esfuerzo es una parte importante para el inicio de grieta. Nuevamente Ebara (2007) y Turnbull y Zhou (2012) realizaron estudios más profundos sobre la naturaleza de la fatiga por corrosión. Ambos trabajos mostraron el proceso de iniciación de grieta, velocidades de propagación de grieta y fractura. En las últimas décadas, se han presentado progresos en el estudio de la fatiga por corrosión y corrosión bajo tensión en álabes de turbina de vapor y otros mecanismos de falla que afectan la vida útil del material en el álabe.

3. METODOLOGÍA

Una serie de tareas serán desarrolladas para alcanzar los objetivos mencionados. Se resolverán problemas de corrosión bajo tensión y fatiga por corrosión a través del estudio de la mecánica de la fractura y técnicas electroquímicas para la detección de grietas y sus efectos de daño sobre los álabes de las turbinas de vapor. A continuación, se describe de forma detallada cada una de las etapas y método de ejecución.

ETAPA 1: METODOLOGÍA ANALÍTICA

La estimación de vida por fatiga en álabes de turbina se puede obtener creando primeramente un histórico de tensiones a través de los métodos de strain- life en fatiga de Smith Watson Topper (SWT), curva stress- life y velocidad de propagación de grieta.

- a) Curva strain- life: Este método se basa en la observación de esfuerzos y deformaciones en lugares críticos de un componente o estructura. Aunque muchas componentes se diseñan de tal manera que el esfuerzo nominal permanezca elástico, las concentraciones de esfuerzos frecuentemente se desarrollan causando deformación plástica cerca de la punta de la grieta, a causa de la restricción impuesta por el esfuerzo elástico del material en la zona plástica.
- b) Stress -life: Se basa solo en los niveles de esfuerzos. Es empleado para aplicaciones de alto ciclo donde esfuerzos y deformaciones son elásticas.
- c) Velocidad de propagación de propagación de grieta: Mediante la mecánica de la fractura elástica lineal (MFLE) es posible comparar el incremento de la velocidad de propagación de grieta en el álabe, mediante el factor de intensidad de esfuerzo.

ETAPA 2: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Después, de someter a un ensayo de fatiga con cargas hasta la rotura; se someterá nuevamente a fatiga, pero en ambiente corrosivo. Se utilizarán las técnicas electroquímicas para el proceso de fatiga por corrosión (CF) y corrosión bajo tensión (SCC) simulando las condiciones de ambiente dentro de la turbina de vapor. Para obtener las señales en potencial y corriente se diseñará una celda electroquímica adaptada a la geometría de la muestra.

ETAPA 3: METODOLOGÍA NUMÉRICA

Se realizara análisis de elemento finito para establecer las condiciones de frontera obtenidas de las pruebas experimentales y validación mediante el análisis matemático y numérico, para ello se determinará la geometría inicial al medir la posición espacial de puntos localizados previamente sobre la superficie del álabe con una máquina de coordenadas espaciales como se muestra en la figura 2, tales puntos se definen como nodos en el programa de ANSYS y se utilizaran para formar los elementos que constituyen la discretización espacial de la geometría del álabe.

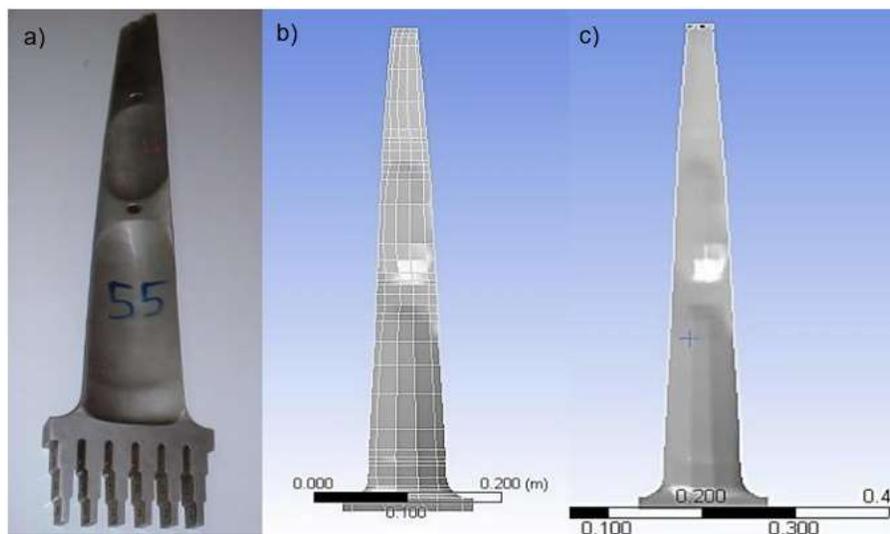


Figura 2. a) álabe real, b) modelo inicial, c) modelo final

Con base en estos resultados y utilizando herramientas estadísticas, se desarrollará un modelo matemático que permitirá la estimación de confiabilidad y vida útil de los álabes. Es necesario desarrollar herramientas que permitan la evaluación y estimación de la vida útil antes del inicio de una grieta y cuando está presente bajo condiciones de resonancia y en presencia de la corrosión; determinar el factor de intensidad de esfuerzos analizando las teorías existentes y construir la herramienta necesaria para este tipo de análisis. El resultado de esta investigación permitirá entender el fenómeno de la propagación de la grieta bajo ambiente corrosivo y en carga-fatiga y carga-tensión presente en los álabes de turbina, así como el diagnóstico de falla.

4. RESULTADOS

Se analizaron los efectos de la corrosión bajo cargas mecánicas mediante las técnicas electroquímicas para la evaluación de los procesos de corrosión bajo tensión y fatiga, a través del uso de sensores y electrodos de platino para la medición de potencial y corriente. Una vez obtenido los resultados experimentales, se determinó de forma analítica y numérica los factores de intensidad de esfuerzo, así como la estimación de vida útil para establecer un diagnóstico de falla a través del análisis de elemento finito. Dado que el trabajo fue experimental y numérico, se requirió de sensores especializados y equipo de cómputo para realizar los análisis numéricos y experimentales, estos equipos fueron adquiridos mediante PRODEP para su utilización y validación de los resultados. A continuación, se enlista de forma resumida las etapas del desarrollo del proyecto.

Etapa 1. Diseño de la celda electroquímica. Se diseñó una celda electroquímica para ser acoplada en la máquina de fatiga tipo Moore y realizar las pruebas de corrosión bajo carga mecánica, la cual consta de dos electrodos de trabajo y uno de referencia con la finalidad de llevar a cabo pruebas de corrosión bajo cargas mecánicas.

Etapa 2. Diseño de un potencióstato de bajo costo. Con el apoyo de un alumno de la Licenciatura de Mecatrónica se diseñó un potencióstato de bajo costo para controlar el proceso de medición de corriente y potencial en rangos desde nano y miliamperios. Este potencióstato se empleó para la medición de corrosión a través de técnicas electroquímicas, para ello se diseñó la interfaz y el sistema de adquisición de datos, mediante WINDOWS FORM y VISUAL STUDIO.

Etapa 3. Pruebas de fatiga. Se realizaron pruebas de fatiga en condiciones inertes y ambiente corrosivo, bajo condiciones de esfuerzo mecánico para estudiar el deterioro del material a partir de sus propiedades mecánicas. Se seleccionó un rango de muestreo para realizar las pruebas de fatiga en aire y fatiga en combinación simultánea con un ambiente agresivo, para ello, se utilizó la técnica de medición de ruido electroquímico con dos electrodos diferentes: platino y acero. Las mediciones de ruido electroquímico fueron registradas por un potencióstato.

Etapa 4. Estimación de vida a fatiga. Con los resultados obtenidos en la parte experimental, fue posible determinar la estimación de vida a fatiga a partir del registro de

tensiones a través del método de strain-life en fatiga de Smith Watson Topper (SWT), la curva stress-life y la velocidad de propagación de grieta, los cuales se basan en los niveles de esfuerzo, deformaciones y tamaños de grieta mediante elemento finito. Por otro lado, se desarrolló un modelo matemático para la predicción de probabilidad de daño a través de un modelo simplificado para las picaduras de corrosión y crecimiento de grieta en fatiga por corrosión, el modelo fue desarrollado en MATLAB.

Etapa 5. Validación de resultados mediante elemento finito. Se realizaron estudios numéricos para la estimación de vida a fatiga mediante el cálculo del factor de intensidad de esfuerzos (SIF) a lo largo de las grietas, ubicadas sobre las superficies de la muestra, basados en la tenacidad a la fractura del acero. Se aplicaron condiciones de carga para determinar las zonas críticas de la muestra para varias longitudes de grieta. Los factores de intensidad de esfuerzo se obtuvieron para predecir el comportamiento de crecimiento de la grieta por fatiga y la estimación de vida útil mediante el uso del programa ANSYS WORKBENCH.

5. CONCLUSIONES

El presente proyecto de investigación tuvo como finalidad aportar el fortalecimiento de las redes de trabajo con investigadores del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, quienes estuvieron colaborando en esta investigación. Sin embargo, desde el punto de vista académico la incidencia de este proyecto ha tenido impacto en los estudiantes del Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, mediante el aprendizaje de la metodología abordada en este proyecto, siendo aplicada y desarrollada para la elaboración de proyectos y tesis. Finalmente, los resultados obtenidos de este proyecto impactarán en el área de investigación para mejorar el diseño de materiales de álabes con el objetivo de minimizar los altos esfuerzos y prolongar la vida útil en las turbinas de vapor.

REFERENCIAS

Hyojin, Kim. (2013). Crack evaluation of fourth stage blade in a low-pressure steam turbine. *Engineering Failure Analysis* (18)3, 907-913.

Segura J.A. (2011) Determinación de Fuerzas Inducidas por Flujo de Vapor en Turbinas, Tesis doctoral, CIICAp, Cuernavaca, Morelos; México

Rodríguez J.A. (2014) Failure Analysis to Blades of Steam Turbines at Normal Conditions of Operations and Resonance

González V. (2014), “Mecánica de Fractura”, Ed. Limusa, Noriega Editores, 2da edición, México.

Krishna, T.S.S.R y Lakshmana Kishore, T. (2012). 3D Modeling and dynamic characterization of steam turbine packet blade and cyclic symmetric analysis. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 1(3), 460-464.

Ebara, R., Yamada, T. y Kawano, H. (1990). Corrosion fatigue process of 12 Cr Stainless Steel. *ISIJ International*. (30)7, 535-539.

Turnbull, A. y Zhou, S. (2012). Comparative evaluation of environment induced cracking of conventional and advanced steam turbine blade steels. Part 2: Corrosion fatigue. *Corrosion Science*. (53)1, 503-512.

Kondo, Y. (1989). Prediction of fatigue crack initiation life based of pit growth. *Corrosion Science*. (45)1, 7-11.

Hopper, D.W. y Goswami, T. (1993). Pitting corrosion fatigue of aircraft materials. *Engineering Failure Analysis*. (26)8, 601-628.

Popoola, L., Grema, A.S. Balogun, A.S. y Gutti, A. (2013). Corrosion problem during oil and gas production and its migration. *International Journal of Industrial Chemistry*. (4)35, 1-15.

Productos generados

Artículos

Yahir-de-Jesús Mariaca-Beltrán, Israel-Arubi García-Salmoran, Christian-Marisol Clemente-Mirafuentes, José-Alfredo Rodríguez-Ramírez, Juan-Carlos García-Castrejón, Mario Acosta-Flores. (2019). Nueva metodología para el análisis de sistemas mecánicos utilizando modelos a escala y leyes de similitud. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 94(1): 59-66

Cuevas-Arteaga., C.M. Clemente, J.A. Rodríguez. (2019). Crevices corrosion in cracks of aisi-410 used in steam turbines blades. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18(1): 13-26.

C.M. Clemente, J.A. Rodríguez, C. Cuevas-Arteaga, Y. Mariaca , J.M Rodríguez. Corrosion fatigue analysis in power steam turbine blades. EN PROCESO

Memoria en extenso

C.M. Clemente, J.A. Rodríguez, M.A. Zalapa, O. Tenango. (2019). Corrosión por fatiga en un álabe de turbina de vapor de baja presión expuesta en agua de mar sintética. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*.

Formación de recursos

1-. Daniel Alexis Flores Torres. (2019). Método teórico y experimental para la obtención de parámetros modales de un riel en estado libre-libre. (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

2-. Luis Daniel Ramos Tejada (2020). Desarrollo y diseño de un potencióstato para la adquisición de señales de ruido electroquímico. (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.