

EFECTO DE LAS GRIETAS EN LAS FRECUENCIAS NATURALES Y VIDA REMANENTE EN ÁLABES DE LA ETAPA L-0

EFFECT OF CRACKS ON THE NATURAL FREQUENCIES AND REMAINING LIFE OF THE L-0 STAGE BLADES

JOSÉ ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ¹
JANUSZ KUBIAK SZ¹
JOSÉ ÁNGEL SEGURA¹
JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN¹

FECHA DE RECEPCIÓN: 27 DE ABRIL DEL 2007. FECHA DE ACEPTACIÓN: 6 DE JULIO DEL 2007.

RESUMEN

La variación de las frecuencias naturales y la vida remanente en álabes del último paso se analizaron de manera experimental y los resultados obtenidos fueron utilizados para validar cálculos del modelo realizado por el Método de Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés) de las frecuencias naturales del grupo de álabes en condiciones de operación, con fractura y sin ella.

Para evaluar las frecuencias naturales de manera experimental se efectuaron cortes en diferentes posiciones (una grieta a la vez) y se compararon con las obtenidas mediante la construcción del modelo en FEM. Se construyó un modelo en FEM de un grupo de 10 álabes y se realizaron simulaciones

con grietas localizadas en diferentes posiciones del grupo. Se obtuvieron las frecuencias naturales para estimar la vida remanente.

Adicionalmente se calculó el esfuerzo medio y el alternante del grupo de álabes. La vida remanente fue calculada una vez iniciado un tamaño de grieta hasta alcanzar un tamaño crítico de grieta. Los resultados obtenidos son de gran ayuda para la detección de grietas durante la operación y evitar accidentes de pérdidas considerables de las turbinas aplicando análisis espectral de vibraciones con sensores posicionados en la cubierta de los rodamientos o en el rotor.

PALABRAS CLAVES: FEM, VIDA ÚTIL, FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS.

¹ Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Mor., 62209, México. Autor para correspondencia: rabino_25mx@yahoo.com.mx

ABSTRACT

The variation of the natural frequencies and remaining life of blades in the final stage were analyzed by experiments and the obtained results were used to validate the model calculations performed by the Finite Elements Method (FEM) of the natural frequencies in the blade group during operation, with and without fracture.

To evaluate the natural frequencies by experimentation, a cut was made at different position for each experiment (one crack at a time). Those were compared with the natural frequencies obtained by the FEM model. The FEM model consists of a group of 10 blades, and simulations were made with cracks placed at different positions in the group. The natural frequencies were obtained to estimate remaining life.

Additionally, average and cyclic efforts were calculated for the blades group. The remaining life was calculated for different crack sizes by propagating this until the crack reaches the critical size.

The outcome is a great aid for the detection of cracks during the operation and to prevent important accidents on the turbines, applying spectrum analysis of vibrations with sensors located in the bearing or swivel covers.

KEY WORDS: FEM, USEFUL LIFE, STRESS INTENSITY FACTOR.

NOMENCLATURA

a – Tamaño de grieta.
 a_{avg} -Tamaño de grieta promedio.

E –Módulo de Young
 K – Factor de intensidad de esfuerzos

N – Número de ciclos

K' - Resistencia cíclica

S'_f -Coeficiente de resistencia a la fatiga

b - Exponente de resistencia a la fatiga.

Δe = Rango de deformación local

Δs -Rango de esfuerzo local

K_f -Factor de concentración de esfuerzo a la fatiga

ΔS -Intervalo de esfuerzo alternante

n' -Exponente de dureza a la deformación cíclica

$2N_i$ -Número de esfuerzos reversibles para la falla.

s' -Esfuerzo medio.

e_f Coeficiente de ductilidad a la fatiga

c Exponente de ductilidad a la fatiga

K_c -Tenacidad a la fractura

C, m - Constante empíricas de la ley de Paris

x, y, z -Coordenadas

Subíndice

f -fatiga

m - medio

i - iésimo

INTRODUCCIÓN

Los riesgos de falla en equipos de generación de energía se presentan en gran medida a causa de sus condiciones de operación. Generalmente, la gran mayoría de estas máquinas están sujetas a cargas de tipo alternantes, lo que origina fatiga en sus componentes (Rao, 2000).

Estas cargas de tipo dinámico en muchas ocasiones contribuyen al crecimiento de grietas que fracturan el material, dando como resultado paros forzosos de la máquina y en los peores casos accidentes catastróficos. Las turbomáquinas no son la excepción, a este tipo de problemas a causa de estar sujetas a cargas alternantes provenientes de diferentes fuentes: flujo de vapor, armónicas de giro, desbalance, imperfecciones en la garganta mínima, secuencias de apertura de válvulas, etc.

En las turbinas de vapor, durante su operación, se originan fuerzas de excitación que como consecuencia producen vibración en sus componentes y en un determinado tiempo se origina fatiga en ellos (Kubiak y Carnero, 2003).

Estas fuerzas de excitación por flujo de vapor contribuyen a la aparición y crecimiento de las grietas en sus componentes. Los álabes de las etapas de baja presión, son las partes más expuestas a estas fuerzas. En estas etapas, los esfuerzos centrífugos originados por la velocidad del rotor, están muy por encima de los esfuerzos fluctuantes, lo que origina que por los grandes tamaños de los álabes en estas etapas, se presenten problemas para resistir la combinación de los esfuerzos, estando más propensos a la falla (Rao,

1991). En ocasiones, estos álabes se fracturan provocando pérdidas económicas por paros forzosos; en la mayoría de los casos las grietas en los álabes son indetectables originando daños irreparables en componentes de estas turbinas.

Debido a lo anterior, en este trabajo se propone desarrollar una herramienta que facilite el diagnóstico de aparición de grietas y así, de esta manera, prevenir cualquier tipo de pérdida, así como la estimación de vida útil de los álabes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las frecuencias naturales del álabe se midieron de manera experimental y se calcularon usando el Método de elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés). Los datos experimentales sirven como soporte en el desarrollo y validación del modelo por este método.

Se modeló y analizó un grupo de diez álabes, utilizando el procedimiento anterior, se le aplicó una velocidad de giro de 3600 rpm y se obtuvieron sus frecuencias naturales.

En un álabe del modelo numérico del grupo se insertó una grieta para simular la fractura aplicándose las condiciones anteriores de prueba para el grupo sin grieta.

Este mismo cálculo se repitió 2 veces más cambiando la posición del álabe fracturado dentro del grupo.

Se compararon los resultados obtenidos y con base en ellos se propusieron varios tamaños de grieta en diferentes localizaciones correspondientes a las diferentes fallas reportadas con anterioridad (Kubiak, 2002). Se aplicaron diferentes teorías

para la obtención de los parámetros necesarios del desarrollo del modelo en elementos finitos para la determinación del número de ciclos antes de que se presente la grieta y su propagación cuando se presenta la grieta y llegar a su tamaño crítico. Los esfuerzos en la punta de la grieta se calcularon para realizar un diagnóstico de vida útil de los álabes.

Los álabes utilizados son de un material conocido como AISI 410; algunas de sus propiedades mecánicas y composición química se muestran en el cuadro 1.

Cuadro1. Propiedades mecánicas y composición química del material AISI 410.

PROPIEDADES MECANICAS		COMPOSICION QUIMICA	
E	200GP	C	0.15
v	0.3	Cr	12.5
σ_u	834MP	Fe	86
σ_y	721MP	Mn	1
		P	0.04
		S	0.03

TRABAJO EXPERIMENTAL

Para medir las frecuencias naturales de forma experimental, se seleccionó y analizó un álabe de la última etapa de una turbina de vapor de 110 Mw, los cuales tienen una longitud aproximada de 60 cm.

El álabe se fijó en una base cilíndrica con 50 kg de babbit. Se colocó un acelerómetro pequeño Kistler tipo 8720A500 en la superficie del álabe (parte superior, parte inferior y parte media). El martillo Kistler tipo 9722A2000 se usó para excitar el álabe, fig. 1.



Fig.1.Equipo utilizado en la obtención de frecuencias naturales.

Para la grieta en el álabe, se hizo un corte de 0.5 mm mediante un proceso de electro-erosión a 150 mm de la base y 20 mm de longitud como se observa en la figura 2.



Fig. 2. Grieta en la orilla de ataque del flujo de vapor del álabe de la etapa L-0

CÁLCULO NUMÉRICO

La geometría del álabe para el cálculo numérico se determinó al medir la posición espacial de puntos localizados previamente sobre la superficie del álabe con una máquina de coordenadas tridimensional, estos puntos se definen como nodos en el programa de elementos finitos y con ellos se formaron los elementos, que constituyen la discretización espacial de la geometría del álabe. Se usaron 396 nodos y 190 elementos para la formación del grupo de 10 álaves. Se realizó una pequeña incisión del mismo tamaño al experimental en el álabe para la obtención de las frecuencias naturales. Utilizando el mismo procedimiento se hicieron los cálculos del grupo de 10 álaves y se cambió la posición de la grieta en tres diferentes álaves.

CÁLCULO DE VIDA ÚTIL

También denominado remanente del álabe y en el grupo, se inició utilizando la aproximación de Neuber calculando la deformación local (Neuber, 1961), que se representa por la siguiente fórmula:

$$\Delta\sigma \left[\frac{1}{E} \Delta\sigma + 2 \left(\frac{1}{2K'} \Delta\sigma \right)^{1/n'} \right] = \frac{(K_f \Delta S)^2}{E} \quad (1)$$

Las fuerzas de excitación de vapor (García *et al.*, 2007) y la velocidad de rotación, 3600rpm, son necesarias para el cálculo de los esfuerzos a los que se someten los álaves y estimar su vida útil. Se aplican en forma nodal en cada álabe aproximadamente a la mitad de

su altura, en x, y, z. y con la velocidad de rotación mencionada.

Cada uno de los datos de entrada utilizados son resultado de pruebas reportadas en literatura, Cuadro 2.(Rao, 2000).

Cuadro 2. Propiedades del material.

$K' = 758 \text{ Mpa}$
$n' = 0.14$
$\sigma'_f = 1655 \text{ Mpa}$
$b = 0.076$
$\varepsilon'_f = 0.73$
$c = 0.62$
$K_{IC} = 137.375 \text{ MPa}\sqrt{m}$
$C = 1.35 \times 10^{-10}$
$m = 2.25$

Se obtiene el esfuerzo real local calculado en los puntos de interés del álabe.

La ecuación de Neuber se puede utilizar de la siguiente manera:

$$\frac{(K_f \Delta S)^2}{E} = \Delta\varepsilon \Delta\sigma$$

Se determinó la deformación local y se utilizó en la ecuación siguiente para determinar el número de ciclos antes del inicio de grieta, ecuación (3).

$$\frac{1}{2} \Delta\varepsilon = \frac{1}{E} [\sigma'_f - \sigma_m] (2N_i)^b + \varepsilon'_f (2N_i)^c$$

Se determinó el factor de intensidad de esfuerzos del modelo por elementos finitos del grupo de álaves modelando

una grieta de 20 mm y otra de 23 mm, una a la vez, en uno de ellos. Se aplicó una velocidad de rotación de 3600 rpm, se sujetó completamente en la parte inferior de la base del grupo y se aplicaron las fuerzas de vapor a cada álabe. Se procedió al cálculo para la propagación de la grieta.

La Ley de Paris se utilizó para la propagación de la grieta en fatiga una vez que ésta se hace presente. La ecuación (4) muestra el comportamiento de la propagación de grieta de acuerdo a esta ley (Paris y Erdogan 1963).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

RESULTADOS Y DISCUSION

SIN FRACTURA

El cuadro 3 muestra los resultados obtenidos de la medición y cálculo de un solo álabe donde se valida el modelo de elementos finitos con la medición de las frecuencias naturales.

Cuadro 3. Resultados medidos y calculados de las frecuencias naturales de un solo álabe.

Frec. Nat.	Medido	Calculado
	(Hz)	(Hz)
1	60.6	60.277
2	153.3	157.78
3	298	304.46
4	446.87	485.04
5	563.21	707.29

De acuerdo con los resultados obtenidos, existe relación entre los medidos y los calculados hasta la cuarta frecuencia

natural. Para fines experimentales de diagnóstico durante la operación de la turbina sólo la primera frecuencia natural será considerada; estos resultados también validan el método para de esta manera el álabe tenga fisura y realizar la medición.

Fracturado

La medición de las frecuencias naturales con diferentes tamaños de grieta se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Frecuencias naturales del álabe, la longitud de 20 mm fue medida y las de 10, 15 y 20 mm, fueron calculadas.

Frec. Nat.	Medidas	Calculadas		
	20 mm	10 mm	15 mm	20 mm
	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)
1	55	58.2	57.8	56
2	128	152	150	147
3		292	290	285
4		478	476	474
5		702	702	697

Se observó que un corte de 10 mm de longitud causa en la primera frecuencia natural una variación de 2 Hz suficiente para ser detectado por análisis espectral con equipo especial de vibraciones mecánicas.

El corte de 20 mm realizado al álabe varió la primera frecuencia natural de 60.6 Hz a 55 Hz. De acuerdo con los resultados, a medida que la grieta aumenta en tamaño, las frecuencias naturales descienden de una manera proporcional al tamaño de grieta, lo que facilitaría aún más su detección y determinar cuando un álabe se encuentra fracturado; siendo de gran importancia en la prevención de accidentes.

NOTA TÉCNICA

Al existir una buena relación entre el resultado medido y calculado de la primer frecuencia natural en los dos experimentos y modelos (sin grieta y con ella), se procede a realizar el modelo por FEM del grupo de 10 álabes.

FRECUENCIAS NATURALES DEL GRUPO DE ÁLABES.

SIN FRACTURA

En turbinas de vapor de 110 Mw los álabes están divididos en 11 grupos de 10 álabes, a causa de esto, se construyó un modelo de elemento finito de un grupo de 10 álabes usando el modelo previo del álabes. Este modelo se muestra en Fig. 3.

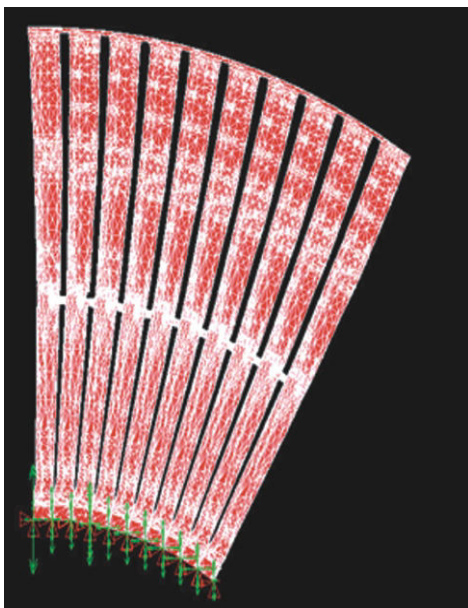


Fig. 3. El modelo FEM del grupo de 10 álabes.

Las frecuencias naturales del grupo se obtuvieron del rotor de la turbina de vapor de 110 Mw, durante un periodo de mantenimiento. (Kubiak, 2002).

Las frecuencias naturales calculadas y medidas del grupo de álabes sin ningún tipo de grieta se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Frecuencias naturales calculadas y medidas del grupo de 10 álabes a 0 rpm.

Frec. Nat.	Medida 0 rpm	Calculada 0 rpm
	(Hz)	(Hz)
1	137.5-140	127.88
2	182.5-185	200.74
3	212-215	256.7
4	272.5-275	377.36
5	412.5	458.09

Frecuencias naturales del grupo de álabes con grieta en tres de ellos, uno a la vez.

Con fractura en tres diferentes álabes

Las frecuencias naturales del grupo de álabes se cálculo a 0rpm y se simuló una grieta en el primero, segundo y tercer álabes, uno a la vez. Los resultados del primero al tercero se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Frecuencias naturales del grupo de 10 álabes con grieta a 0 rpm.

Frec. Nat.	Sin grieta	1er Álabes	2do. Álabes	3er Álabes
	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)
1	128	113	121	113
2	201	184	191	182
3	257	237	249	240
4	377	355	369	357
5	458	420	436	402

Se observa que en los 3 casos (Cuadro 6) la primera frecuencia natural decrece al menos 15 Hz lo cual es muy significativo desde un punto de vista de la detección de la variación del espectro de vibraciones al hacer algún mantenimiento preventivo en planta.

Las frecuencias naturales del grupo de álabes a 3600 rpm, se calculó simulando grietas en 3 álabes (considerando la grieta en un álabe a la vez). El resultado se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Frecuencias naturales del grupo de 10 álabes con grieta a 3600 rpm.

Frec. Nat.	Sin grieta (Hz)	1er Álabe (Hz)	2do. Álabe (Hz)	3er. Álabe (Hz)
1	152	143	144	139
2	228	222	220	214
3	276	269	269	262
4	392	382	384	375
5	499	465	478	450

El modelo del grupo de álabes con la grieta en el tercer álabe se observa en la figura 4.

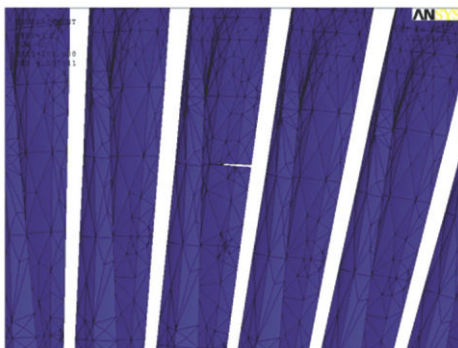


Fig. 4. Modelo de grupo de álabes con grieta en el tercer álabe.

Estimación de vida útil del grupo de álabes. Inicio de grieta

Se calcularon, en el modelo numérico del grupo de álabes, los esfuerzos medio y fluctuante en la zona donde se realizó la grieta, con la aplicación de las fuerzas de vapor, obteniéndose los resultados siguientes, $\sigma_m = 723.901$ MPa e intervalo de esfuerzo (fluctuante), $\Delta S = 59.22$ MPa.

Estos esfuerzos calculados presentes en el grupo de álabes, se tomaron en cuenta para obtener el inicio de propagación de grieta en el álabe al sustituirse estos resultados en las ecuaciones 1, 2 y 3. Los valores que se obtuvieron fue el número de ciclos hasta el inicio de la grieta.

La Fig. 5 presenta el número de ciclos antes de comenzar la grieta, variando el factor de concentración de esfuerzo a la fatiga entre 3 y 4 (para el caso del tipo de material de los álabes es 3). Se observó que la variación del factor de concentración de esfuerzo a la fatiga es un parámetro importante, esto significa que para el diseño de álabes se debe determinar la elección de un material con un factor pequeño entre otras condiciones.

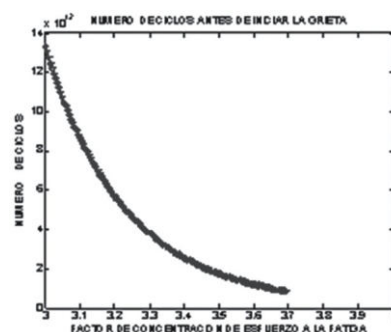


Fig. 5. Inicio de la grieta con factor concentración de esfuerzos a la fatiga.

PROPAGACIÓN DE LA GRIETA

Una vez que se tiene presencia de grieta en el álabe se determinó la propagación de la misma con base al factor de intensidad de esfuerzos, aplicándose la Ley de Paris (Paris y Endrogan, 1963), para la obtención del número de ciclos hasta alcanzar un tamaño crítico de grieta.

La Fig.6 muestra uno de los modelos donde se realizó la fractura para la obtención del factor de intensidad de esfuerzos.

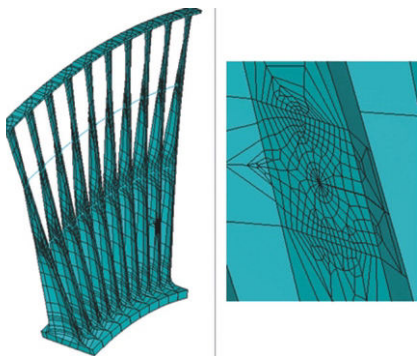


Fig. 6. Modelo discreto del grupo de álaves con grieta.

Se requirió determinar el factor de intensidad de esfuerzo máximo y mínimo para diferentes tamaños de grieta y, posteriormente, calcular el ΔK . El cuadro 8, muestra los resultados de la aplicación del FEM al grupo de álaves para la obtención de los factores de intensidad de esfuerzos máximo y mínimo para dos tamaños de grieta de 20 y 23 mm, así como el incremento del factor de intensidad de esfuerzo. Del análisis con la aplicación de las fuerzas de vapor y la presencia de la grieta de 20 mm, Fig. 7, se obtienen los esfuerzos. Se observó que cerca de la

punta de la grieta en la parte superior se presenta el máximo esfuerzo con un valor de 1906.5 MPa. De acuerdo al material de los álaves excede al esfuerzo último lo que afectaría la vida útil del álabe y como consecuencia mayor el funcionamiento de la turbina de vapor.

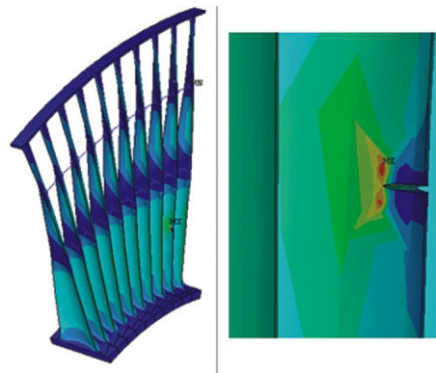


Fig. 7. Esfuerzos máximos del grupo de álaves en la punta de la grieta.

El factor de intensidad de esfuerzo máximo en el tamaño de grieta 23 mm es de $136.366666 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ y el factor de tenacidad del material es de $137.375 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ existiendo una variación de 0.66%. Por lo tanto, se consideró de acuerdo a resultados que el álabe podría soportar un tamaño de grieta máximo de 23 mm antes de que ocurra la falla.

Cuadro 8. Factores de intensidad de esfuerzos de 2 tamaños de grieta.

a (mm)	K ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)		ΔK ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
	K_{max}	K_{min}	
22	131.52	131.3687	0.15125
23	136.366	136.313	0.1533

La Ley de Paris (Paris y Endrogan, 1963), se utilizó para estimar la vida útil en ciclos una vez presente la grieta hasta un tamaño de grieta final donde la falla será inminente. De acuerdo a resultados obtenidos de la simulación numérica el tamaño de grieta para la fractura es de 23 mm.

En el cuadro 9, se presenta el resultado de la aplicación de la Ley de Paris para diferentes tamaños de grieta y se obtuvieron los números de ciclos para alcanzar el tamaño final de grieta que soporta el álabe y su vida útil.

Cuadro 9. Números de ciclos para propagación de diferentes tamaños de grieta.

Grieta inicial (mm)	Grieta final (mm)	Número de ciclos
15	23	4996141677.5
18	23	2854685248.3
20	23	1587019099.1
22	23	519220246.50

Al realizar los cálculos y obtener los resultados finales, la Fig. 8 muestra la propagación y vida útil del álabe en número de días al presentarse un tamaño de grieta determinado y obtener el tiempo que puede seguir trabajando una vez presente la grieta.

Se observa que al estar presente una grieta de 15 mm tardará aproximadamente 15 días en llegar a la grieta de 23 mm, que, como se observó, es donde el factor de intensidad máximo de esfuerzos sobrepasa al factor de tenacidad a la fractura.



Fig. 8. Propagación de grieta en grupo de álabes.

De acuerdo con los resultados obtenidos, una vez que se realice un análisis preventivo, como se mencionó anteriormente, será sencillo detectar si en un grupo de álabes existe alguna grieta con análisis espectral, también en caso de existir en determinado grupo, al realizar un análisis más detallado se podría detectar en qué álabes existe la grieta y el tamaño de la misma. Al obtener el tamaño de grieta, se puede determinar que tan peligrosa es, además del tiempo que tardaría en llegar a resultados catastróficos. Aún sin grieta se determina el tiempo que tardará o el número de ciclos, antes de que se presente una grieta.

CONCLUSIONES

Las mediciones experimentales y cálculos numéricos muestran que las frecuencias naturales tanto en álabes aislados como en álabes en grupo, disminuye por la presencia de grietas. El decremento en las frecuencias naturales aumenta a medida que el tamaño de grieta aumenta.

El decremento de las frecuencias naturales por la presencia de grietas, puede detectarse por análisis espectral de vibraciones.

Al detectar variación en las frecuencias naturales del grupo de 10 álabes a 3600 rpm con un tamaño de grieta de 20 mm, cuando el tamaño de grieta crítico es de 23 mm, la diferencia de 3 mm se alcanzó en un tiempo de 25 h, tiempo suficiente para detener el equipo.

BIBLIOGRAFÍA

Neuber, H. 1961. Theory of stress concentration for shear-strained prismatic bodies with arbitrary non-linear stress-strain law. ASME. J. of App. Mech. 26(4)544-550

García, J.C.; Kubiak, J.; Sierra, F. and Urquiza, G. 2007. Flow analysis of the Steam Turbine Curtis Stage in Steady State and Transient Conditions Applying CFD. Electric Power Conference, Chicago, Illinois, USA, May 1-3, 2007.

Kubiak, J. 2002. Diagnóstico de Fractura de los Álabes L-0 de la Turbina. Reporte Interno del EM-CIICAp, No. 6P/DM. Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, (UAEM-CIICAp). Cuernavaca, Morelos, México.

Kubiak, J. y Carnero, A. 2003. Detección de Fallas en Alabes. Reporte Interno. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, México.

Paris, P.C. and Erdogan, F. 1963. A critical analysis of crack propagation laws. Transactions ASME, Series D. 85 (4) 528-534.

Rao, J. S. 1991. Turbomachine Blade Vibration. New Delhi: Wiley Eastern Ltd. 445 p.

Rao, J. S. 2000. Turbine blade life estimation. Alpha Science Internacional Ltd, UK. 352 p.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Carmen por las facilidades y apoyo recibido.

J.A Rodríguez y J.C. García agradecen al CONACYT por el apoyo económico brindado durante la realización de este trabajo, (números de becario CONACYT: 204317 y 194907 respectivamente).

Forma correcta de citar este trabajo.

Rodríguez Ramírez, J.A.; Kubiak Sz, J. Segura J.A. y García J.C. 2007. Efecto de las grietas en las frecuencias naturales y vida remanente en álabes de la etapa L-O. U Tecnociencia1 (1)29-39