



**INSTITUTO DE
TECNOLOGIA**

PROF. JORGE A. SABATO

**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN
COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA**

**MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES**

**ESTUDIO NO DESTRUCTIVO
DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL
DE ÁLABES DE TURBINAS**

Christian R. Romero Rosero

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
“Prof. Jorge A. Sabato”**

**Estudio No Destructivo acerca de la Integridad de
Álabes de Turbina (*)**

Por Ing. C. Rodrigo Romero Rosero

Director

Dra. M. Fernanda Ruiz Gale

Dra. Marta Ruch

(*) Tesis para optar al título de *Magíster en Ciencias y Tecnología de Materiales*

República Argentina

2012

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
CENTRO DE INFORMACION C A C

Agradecimientos

Doy gracias a mis padres, Rodrigo y Elena, quienes me mantuvieron siempre motivado para conseguir mis metas, a mis hermanos, Carolina y Alexander, por su apoyo incondicional durante estos dos años de estudio y trabajo.

Al Instituto Jorge Sabato y la Comisión Nacional de Energía Atómica por abrir sus puertas y permitirme ser parte de esta gran familia.

Al Dr. Ricardo Carranza y el Dr. Manuel Iribarren, por su apoyo durante estos dos años.

A mis directoras, María Fernanda y Marta, por permitirme realizar este trabajo de tesis y por cada una de sus acertadas observaciones y contribuciones que permitieron la finalización de este trabajo.

A Karim, a quien recurrí en incontables ocasiones en busca de una guía y aportó de manera formidable, a Luis Ibáñez por su predisposición para darme una mano cada vez que se lo solicité, a José y Cristina por su colaboración en la etapa experimental.

A cada uno de los profesores de la Maestría por los conocimientos impartidos.

Con mucho aprecio a mis compañeros y amigos de la Maestría que se convirtieron en mi familia en Argentina: Florencia, Edgar, Carlitos, Fabian, Gaby, Nicolás, Carlos, Nelson, Guillermito, Crispulo, Rudy, Darío, Adrián y Matías.

Al personal del departamento del ENDE que de alguna u otra manera aportaron en este trabajo, a Alberto Pastorini por su oportuna asistencia en la etapa de corrección y en especial al grupo IAMEND, que destaco no solo por su trabajo sino también por su calidez humana.

Resumen

Los álabes rotatorios de una turbina de vapor son considerados componentes críticos en las centrales de generación eléctrica, no solo por la importancia económica que representan sino también por los riesgos existentes, como la ruptura catastrófica. Estos componentes de la turbina a menudo presentan problemas de fatiga, corrosión bajo tensión, corrosión por fatiga, erosión, vibraciones, debido a diversos factores como la química del agua, selección de materiales, condiciones de operación, entre otros.

Se presenta un análisis modal de álabes de turbina de etapa de baja presión empleando distintas técnicas. La metodología contempla el levantamiento geométrico del álabe empleando un escaneo láser tridimensional, el posterior modelaje empleando elementos finitos y la aplicación de distintas condiciones de sujeción en la raíz con el programa COSMOS/M y la medición experimental de las frecuencias y modos de vibración empleando sensores de contacto y vibrómetro láser para validar el modelo matemático.

Los resultados muestran que el comportamiento dinámico del álabe se ve influenciado por la condición de ajuste en la raíz. Dada la disponibilidad en el laboratorio de un álabe retirado de servicio y tres álabes nuevos se trató de encontrar diferencias en la frecuencia de vibración entre ellos, pero los resultados obtenidos no mostraron diferencias significativas contundentes para distinguirlos.

Abstract

Rotating blades of steam turbines are critical components of electric power plants, not only because of their economic importance but also because of the risk of catastrophic failure. The blades may currently suffer fatigue, stress corrosion, fatigue corrosion, erosion, vibrations, due to various factors, such as water chemistry, material selection, operating conditions, among others.

In what follows a modal analysis of the turbine blades in the low pressure stage is presented. Different techniques are used: shape scanning with a 3D laser scanner, finite element modelling with COSMOS/M under variable root fixing conditions, and the validation of the mathematical model through experimental measurements of the natural frequencies and the vibration modes with contact sensors and a laser vibrometer.

The results show that the blade dynamic behaviour is affected by the root fixing condition. Vibration modes of three new blades and of a cracked one removed from service were studied, in the search for significant differences in their natural frequencies and vibration modes, which might provide a NDE method for blade characterization. The results so far did not show any such significant differences.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Centrales Nucleares	7
1.2. Los álabes de la etapa de baja presión de turbinas de vapor	8
1.3. Planteamiento del problema	9
1.3.1. Factores metalúrgicos	9
1.3.2. Factores operacionales	11
1.3.3. Factores de diseño	13
1.4. Los Ensayos no Destructivos en álabes de turbina	14
1.5. Objetivos	17
1.5.1. Lineamiento en base a objetivos	17
1.6. Alcance del presente estudio	18
 2. ANTECEDENTES	 20
2.1. Turbina de la Central Nuclear Atucha I	20
2.2. Datos técnicos de la turbina CNA-I	20
2.3. Estudios previos referidos a la turbina de CNA-I	22
2.4. Estudios preliminares considerados en el desarrollo de la tesis	25
2.5. Otros estudios	27
 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	 28
3.1. Métodos ópticos	28
3.1.1. Escaneo láser tridimensional	28
3.1.2. Vibrómetro láser Doppler	32
3.1.3. Medición de deformaciones con sensores de fibra óptica	34
3.2. Vibraciones	39
3.2.1. Vibraciones libres no amortiguadas	39
3.2.2. Medición de vibraciones	41
3.3. Métodos computacionales. Método de Elementos Finitos (MEF)	43
3.3.1. COSMOS/M - Análisis en frecuencia	44
3.3.2. Propiedades elásticas del material	47
3.4. Flexión en vigas	48
 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS	 51
4.1. Escaneo láser tridimensional	51
4.1.1. Equipamiento empleado	51
4.1.2. Procedimiento	52
4.1.3. Resultados	55

4.2. Modelado del álabe con elementos finitos	56
4.2.1. Modelo de viga en voladizo	57
4.2.2. Modelo tridimensional del álabe	61
4.3. Medición de frecuencias naturales	64
4.3.1. Medición con sensores de contacto	65
4.3.2. Medición con vibrómetro láser	73
4.4. Otras técnicas	77
4.4.1. Sistema de excitación magnética	77
4.4.2. Sistema de medición de deformaciones con sensores de fibra óptica	80
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	84
5.1. Modelo simplificado de álabe de turbina de vapor	84
5.2. Modelo en 3D de álabe de turbina de Vapor de tercera etapa	85
5.3. Medición de vibraciones con acelerómetros piezoeléctricos	88
5.4. Medición de vibraciones con vibrómetro láser	88
5.5. Análisis comparativo	89
5.6. Retroalimentación del Modelo 3D-Evaluación de las condiciones de ensayo	90
5.7. Otras técnicas de excitación y de medición	92
5.8. Sugerencias	94
6. CONCLUSIONES	95
Bibliografía	97
Anexos	104
Anexo A	105
Anexo B1	106
Anexo B2	109
Anexo B3	112
Anexo B4	115

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realizará una introducción al tema, en la que se indicarán los factores considerados, las motivaciones, los objetivos y el lineamiento a seguir para el estudio de los álabes de turbina.

1.1. Centrales Nucleares

Una central nuclear aprovecha la energía liberada por la fisión de un átomo y la transforma en energía eléctrica. En la Central Nuclear Atucha el reactor utiliza uranio natural como elemento combustible y agua pesada como moderador y refrigerante. El agua pesada, que se mantiene confinada dentro del circuito primario, absorbe el calor del reactor adquiriendo una elevada presión y temperatura. Luego transfiere ese calor a un circuito secundario de agua liviana transformándose en el vapor que va a la turbina. El rol de la turbina consiste en transformar la energía contenida en el vapor de agua en energía mecánica, lo que resulta en la rotación del eje de la turbina, el cual conectado a un generador produce energía eléctrica [1], ver Figura 1.1.

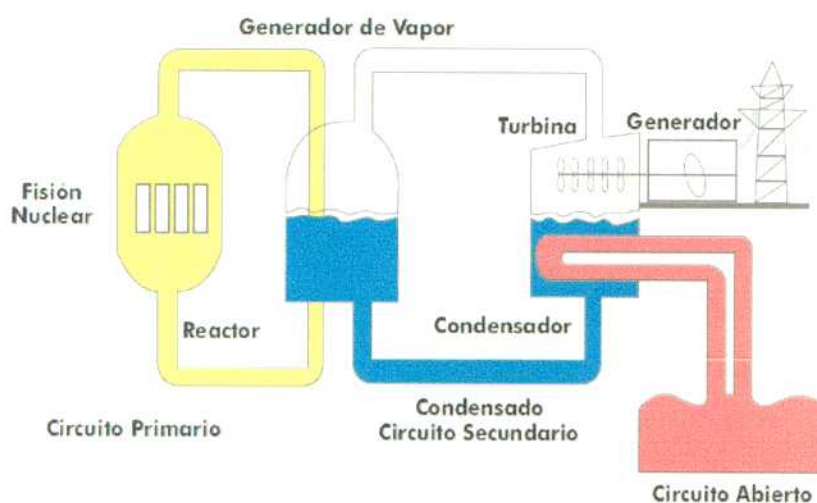


Figura 1.1. Esquema de los circuitos de las Centrales Nucleares de Atucha [1].

Las centrales de generación cuentan con turbinas de varias etapas, identificadas generalmente como alta presión (HP), presión intermedia (IP) y baja

presión (LP) por sus siglas en inglés. Las turbinas de reacción a su vez cuentan con álabes estacionarios y rotatorios, los primeros transforman la energía potencial del vapor en energía cinética y a su vez conducen el flujo hacia los rotatorios. Estos convierten la energía cinética en impulso y fuerzas de reacción causadas por la caída de presión, obteniéndose como resultado el giro del eje de la turbina.

1.2. Los álabes de la etapa de baja presión de turbinas de vapor

El presente trabajo tiene como elementos de estudio los álabes rotatorios del último escalón en una turbina de baja presión. Se entiende por escalón al conjunto formado por una rueda de álabes fijos y una de álabes móviles.

Es importante familiarizarse con las denominaciones de las partes más importantes del elemento a estudiar, ya que se utilizarán con frecuencia de aquí en adelante. La Figura 1.2 esquematiza un álabe de sección transversal asimétrica; comenzando por la parte inferior de la figura de la izquierda se observa la raíz, cuya forma de fijación recibe el nombre “cola de milano”; más arriba se observa el borde de ataque, por donde entra en contacto el álabe con el vapor; el borde de fuga, por donde el vapor deja de tomar contacto con el álabe y en la parte superior, la puntera. En la figura de la derecha se observa el perfil del álabe con la superficie de presión y la de succión.



Figura 1.2. Esquema del álabe. Denominación empleada.

1.3. Planteamiento del problema

Una de las razones por las cuales se estudian los álabes de la etapa de baja presión es la alta tasa de falla que registran. Alrededor del 50% de las fallas se relaciona con Fatiga, Corrosión Bajo Tensión (CBT) y Corrosión por Fatiga [2-5]. Otros mecanismos presentes son el Picado y la Corrosión-Erosión. Usualmente los problemas de corrosión son el resultado de la combinación entre la química del agua, el diseño y la selección de materiales [6]. En la etapa de baja presión las turbinas operan con vapor húmedo y bajo condiciones termodinámicas que favorecen la concentración de impurezas sobre los componentes de la turbina. Estos dos factores contribuyen a la aparición del mecanismo de erosión superficial. La presencia de gotas de agua, cuya velocidad relativa al borde de ataque, es ligeramente mayor y directamente orientada hacia el borde de ataque, provoca estrías, canales, ondas y valles sobre la superficie del álabe. Este tipo de erosión se conoce como erosión por bombardeo de gotas de agua [7, 8].

Para el mayor entendimiento del problema se explican brevemente los factores que se analizaron para encarar este estudio. Se consideraron factores metalúrgicos, de diseño, de operación y fabricación del componente.

1.3.1. Factores metalúrgicos

Se sabe que el álabe está fabricado con un acero inoxidable martensítico AISI 420 [9]. Este tipo de acero es una aleación de hierro, carbono y cromo que posee una estructura cristalina martensítica, cúbica centrada en el cuerpo distorsionada (tetragonal distorsionada). Es un material ferromagnético, templable por tratamientos térmicos y generalmente resistente a la corrosión en ambientes poco agresivos. Los aceros inoxidables martensíticos son similares a las aleaciones hierro-carbono que son austenizadas, endurecidas por temple y revenidas para incrementar su ductilidad y dureza.

La Tabla 1.1, muestra la composición química del acero AISI 420 [10]. El contenido de cromo y carbono está balanceado para asegurar una estructura

martensítica después del endurecimiento. La resistencia obtenida por tratamiento térmico depende del contenido de carbono; en particular para el acero AISI 420 se puede alcanzar hasta 52 HRC [11]. La adición de niobio, silicio, tungsteno y vanadio modifican la respuesta del revenido luego del temple. El azufre o selenio mejoran la maquinabilidad, pero pueden provocar fisuras durante la forja. La maquinabilidad disminuye al incrementarse el contenido de carbono y la resistencia al desgaste varía también con el contenido de este último elemento [12].

Tabla 1.1. Composición química del acero AISI 420.

AISI	Composición nominal, %						
Tipo No.	C	Mn	Cr	Si	P	S	Ni
420	0,15 min	1,0	12-14	1,0 máx.	0,045 máx.	0,030 máx.	1,0 máx.

En la bibliografía se encontró el caso de un álabe de una turbina de etapa de baja presión construido con el mismo acero AISI 420, en donde se reportan fisuras en la primera ranura de la raíz. La generación de fisuras se atribuye a la presencia de picado por ataque de ácido clorhídrico [13], poniendo en evidencia la susceptibilidad del material a sufrir daños en medios agresivos.

Ante los problemas de erosión mencionados anteriormente, los álabes reciben un tratamiento térmico diferenciado sobre el borde de ataque llamado endurecimiento por flama. El endurecimiento por flama es un tratamiento térmico en el cual una porción de una delgada capa de material de una pieza de acero se calienta rápidamente a una temperatura superior al punto crítico del acero. Luego de que el grano se austeniza, se enfría rápidamente la porción, transformando la austenita en martensita, mientras se deja el resto de la pieza en su estado original. En caso de que el enfriamiento sea lento, se produce una transformación pasando por las estructuras perlita, bainita y martensita que resulta en un acero dúctil y blando, lo cual no es deseable [14].

El endurecimiento por flama difiere de un endurecimiento tradicional debido a que la templabilidad necesaria para alcanzar altos niveles de dureza ya está contenida en el acero, y el endurecimiento se obtiene por calentamiento localizado. En el caso

del acero AISI 420 se pueden obtener valores entre 49 y 56 HRC según el medio de enfriamiento [15]. Aunque este tratamiento se utiliza principalmente para desarrollar altos niveles de dureza y resistencia al desgaste, el proceso también mejora la resistencia a la flexión, a la torsión y a la fatiga [14]. Se debe considerar que debido a las altas velocidades de enfriamiento de este tratamiento térmico (gradientes térmicos), la estructura resultante pudiera tener excesiva cantidad de austenita retenida con bajos niveles de dureza y posible transformación a martensita durante el servicio, acompañada de fragilización [16].

En el tratamiento térmico del acero, el signo (+ para tensión y - para compresión) y la cantidad de esfuerzos residuales se puede determinar a través de dos contribuciones competitivas entre sí. La primera contribución proviene de los esfuerzos térmicos, generados por la diferencia de temperatura entre la superficie y el interior del material; en el enfriamiento son de compresión debido a que la superficie se enfría más rápido con más contracción, respecto del material del interior. Por otro lado tenemos la conversión de esfuerzos durante la transformación de fase de la austenita a martensita en el enfriamiento, la transformación es intrínsecamente tensil. Esto es debido a que los átomos de carbón atrapados en los sitios octaédricos producen la tetragonalidad de la estructura cristalina martensítica, creando importantes esfuerzos de tracción con desplazamientos de sus vecinos más cercanos, los átomos de hierro [17]. El resultado de proporcionar un borde de ataque resistente a la erosión es generar tensiones residuales de compresión sobre la superficie. Si el proceso de endurecimiento por flama no se realiza en forma adecuada, se incrementa la susceptibilidad del material a sufrir corrosión bajo tensión (CBT) [18].

1.3.2. Factores operacionales

Dejando atrás el punto de vista metalúrgico y considerando ahora las condiciones de operación de una turbina de vapor asociándolas con las fallas en los álabes, la mayoría son causadas por vibraciones relacionadas con esfuerzos de fatiga [19]. Son las cargas dinámicas las que originan las vibraciones de los álabes. El origen de las cargas dinámicas puede ser diverso [19,20]:

- Desbalances del rotor y carcasas no concéntricas, los cuales causan variaciones del juego circunferencial del rotor. Las geometrías irregulares en la admisión relacionadas con la distribución de presión dentro del flujo de vapor producen fuerzas de excitación.
- Vibraciones asincrónicas, que surgen de la interacción desfavorable entre los álabes y el fluido, las cuales pueden auto-excitar vibraciones de aleteo o de flameo.
- Las vibraciones auto-excitadas, que relacionan las frecuencias naturales del álabe y del rotor. Las prácticas de diseño típico dictan que las frecuencias naturales del álabe y el rotor deban ser por lo menos ocho veces la frecuencia de trabajo constante.
- La mayor fuente de excitación proviene de la interacción entre los álabes rotatorios y los álabes estacionarios. Cuando un álabe rotatorio pasa frente a un álabe estacionario, experimenta fuerzas de elevación repetitivamente en una frecuencia dada por el número de álabes estacionarios multiplicado por la frecuencia del rotor. A esta frecuencia se la denomina "frecuencia de pasaje de álabes estacionarios" [21,22].

Aunque las frecuencias propias de los álabes no coincidan con las frecuencias de funcionamiento en modo estacionario, pueden experimentar varias resonancias durante el transitorio de la máquina. Este problema se magnifica cuando las turbinas tienen muchas etapas con álabes de diferentes características. En estos casos, es posible introducir amortiguamiento.

Un factor importante considerado en el diseño de álabes es la disipación de la energía vibratoria. Existen tres fuentes de amortiguamiento para un álabe de turbina de vapor: amortiguamiento del material, por fricción y por gas. El amortiguamiento del material es complejo en su comportamiento y entendimiento, y no es suficiente para contener las amplitudes resonantes que se producen durante la operación. La fuente de amortiguamiento por fricción la provee la raíz del álabe o la región de fijación, actuando de manera tal que proporciona la acción de deslizamiento para disipar la

energía. Por último el amortiguamiento dinámico por gas contribuye con una cierta cantidad de disipación [19].

1.3.3. Factores de diseño

Hasta ahora se han hecho consideraciones desde el punto de vista metalúrgico y operacional del álabe. También hay que considerar otro factor importante que no se puede pasar por alto, que es la geometría de diseño del álabe. Los álabes de última etapa tienen una geometría compleja que responde a los requerimientos de la mecánica del fluido en movimiento. La caída de presión acompañada del aumento del volumen que se produce en la última etapa requiere que los álabes tengan el mayor contacto con el fluido y esto se consigue con álabes largos y con un perfil aerodinámico [23] como se mostró en la Figura 1.2. Asociado a la geometría de diseño del álabe se tiene el problema de las vibraciones acopladas flexión-torsión que ocurre cuando el centro de flexión no coincide con el centroide como ocurre en los álabes pre-curvados (desde la base a la punta). El problema se agrava aún más con los efectos de segundo orden como inercia rotatoria, flexión de las fibras en torsión, pandeo de la sección transversal, ajuste en la raíz y aceleración de Coriolis. No todos los efectos de segundo orden tienen un efecto significativo, desde un punto de vista ingenieril [19].

Con el propósito de incrementar la eficiencia de una turbina, se han desarrollado diversos diseños de los álabes. Uno de ellos es el álabe con raíz curvada de entrada axial en forma de conífera, CAEFTR por sus siglas en inglés (Curved Axial Entry Fir Tree Root), Figura 1.3. El acoplamiento con curvatura en la raíz permite más flexibilidad en el diseño de la sección aerodinámica con mejoras en el espaciamiento entre álabes ensamblados al rotor. Sin embargo, se registra que los álabes con este tipo de raíz tienen la tendencia de sufrir daños como corrosión bajo tensión, fisuramiento por fatiga de alto número de ciclos o fatiga por bajo número de ciclos y alta deformación. Generalmente las fisuras se encuentran en las dos primeras ranuras de la raíz del álabe [24].



Figura 1.3. Montaje del álabe en el disco acanalado. Acople CAEFTR [24].

Una central nuclear tiene una vida nominal de diseño de aproximadamente 30 años, aunque en los últimos años se reconoce que la vida útil potencial de una central puede ser mayor que la nominal. Debido al rol que cumplen las turbinas en la generación de energía, se las considera como uno de los componentes críticos de las centrales. En los programas de extensión de vida de componentes se analizan y consideran los factores mencionados anteriormente tales como: corrosión, erosión, condiciones inapropiadas de operación y cargas dinámicas que originan vibraciones, con el objetivo de prolongar el tiempo estimado de todos sus componentes. Allí radica la importancia del presente estudio. Además la confiabilidad y vida en servicio de estos componentes es de gran importancia económica.

1.4. Los Ensayos no Destructivos en álabes de turbina

Ensayos no destructivos según ASTM (American Society for Testing and Materials), se define como el desarrollo y la aplicación de métodos físicos que permiten examinar materiales o componentes sin afectar su futura utilidad y aptitud para el servicio, para detectar, ubicar, medir y evaluar discontinuidades, defectos y otras imperfecciones, para determinar su integridad, sus propiedades y su composición y para medir sus características geométricas [25]. El empleo de técnicas no destructivas en álabes de turbina durante la fabricación, en servicio y paradas programadas es bastante difundido [26-34]:

- Inspecciones por láser: se emplean para realizar control dimensional en la etapa de fabricación de estos componentes [26].

- Interferometría holográfica óptica: permite visualizar patrones de vibraciones sobre la superficie de presión y de succión en el álabe, Figura 1.4. Esta técnica contribuye a la inspección y evaluación de álabes de turbina durante las etapas de diseño y fabricación [26,27].

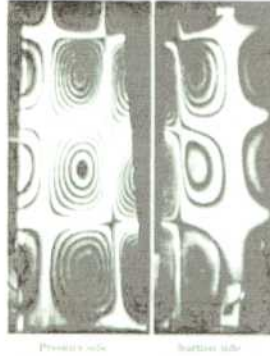


Figura 1.4. Patrones de vibración de un álabe sobre sus superficies de presión y succión. Técnica de Interferometría Holográfica [27].

- Las máquinas de medición de coordenadas (CMM) se utilizan para mediciones de geometrías muy complejas, como en el caso de los álabes de turbinas, en los cuales la precisión de fabricación es considerada un factor crítico [28].
- Se emplea la técnica de radiografía en tiempo real para inspeccionar una gran cantidad de álabes que salen del proceso de fundición y separar fundiciones con exceso de metal debido a fallas en el molde [29].
- Sistemas de tomografía computarizada se utilizan para la inspección de la producción de pequeñas piezas fundidas, piezas forjadas de precisión y sobre todo palas y paletas utilizadas en los motores de los aviones, Figura 1.5. Esta técnica también proporciona información con respecto a espesores de pared [30].

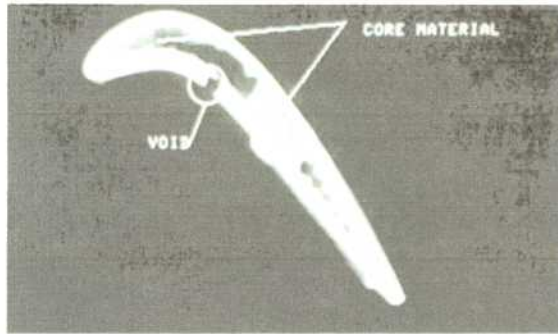


Figura 1.5. Tomografía computarizada de la sección transversal de un álabe [30].

- La radiografía por neutrones se emplea en la inspección de palas de turbina para detectar material cerámico residual en los conductos de refrigeración interior de álabes enfriados por aire. En la Figura 1.6, se muestra una inspección a este tipo de álabes. Uno de los 12 álabes (que se encuentra en la fila superior y el segundo desde la izquierda) contiene material residual en la esquina superior derecha en los conductos de enfriamiento [31].

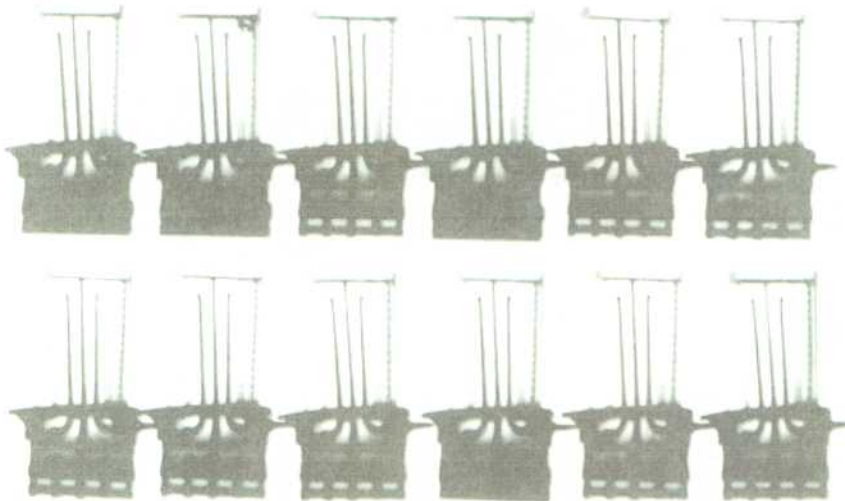


Figura 1.6. Detección de material cerámico residual mediante la técnica de radiografía por neutrones [31].

- La microscopía acústica es reconocida como una herramienta valiosa para la inspección no destructiva y caracterización de materiales. Esta produce imágenes de las capas subsuperficiales de una muestra y se llegan a apreciar defectos internos tales como huecos, inclusiones, delaminaciones y fisuras [32].

- Inspecciones de ultrasonido: se utilizan también para determinar espesores de pared, tanto en la etapa de fabricación como durante las paradas programadas, para determinar si el espesor remanente del elemento es el adecuado para seguir en funcionamiento [33].

Los últimos avances en los procedimientos de inspección visual para examinar la geometría de los componentes se basan principalmente en los sistemas de visión que emplean cámaras electrónicas, junto con sistemas de procesamiento de imágenes [34].

1.5. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es estudiar la integridad estructural de álabes de turbina de vapor empleados en la generación de energía mediante diferentes técnicas ópticas de ensayos no destructivos. Estos resultados se compararán con los obtenidos con técnicas tradicionales disponibles en el Departamento de Ensayos No Destructivos y Estructurales (ENDE). En principio se caracterizarán álabes libres de fallas para luego poder hacer una comparación con álabes defectuosos.

Otro objetivo planteado es incorporar métodos alternativos de ensayos no destructivos que permitan extraer información acerca del estado de los álabes en base a sus frecuencias de resonancia.

Por último se busca incorporar el uso de herramientas de cálculo computacional que sean complementarias a los métodos no destructivos, a través de las cuales se desarrollen modelos que logren una estimación de los valores de las frecuencias de resonancia y sus formas modales.

1.5.1. Lineamiento en base a objetivos

En base a los objetivos propuestos, el eje para el desarrollo de esta tesis fue:

Realizar un escaneo tridimensional del álabe y a partir de estos resultados generar un modelo con el método de elementos finitos con la finalidad de estimar los

valores de las frecuencias naturales de vibración del álabe para una determinada condición de contorno.

Llevar a cabo mediciones de las frecuencias naturales de vibración del álabe sujeto en la raíz. Se propone el uso de acelerómetros de contacto y un vibrómetro láser. Estas mediciones se llevarán a cabo con el grupo de Estudio y Ensayo de Componentes Estructurales (EECE) del ENDE.

Acorde al objetivo de incorporar métodos alternativos de ensayos no destructivos, se plantea la medición de las frecuencias naturales de vibración del álabe, al aplicar esfuerzos de torsión y flexión sobre el mismo mediante campos magnéticos. Dado que los extensómetros convencionales son vulnerables a los campos electromagnéticos y aprovechando la inmunidad que ofrecen los extensómetros de fibra óptica, se propone una medición de las deformaciones causadas por las cargas vibratorias de origen magnético con sensores de fibra óptica con celdas de Bragg.

Por último se propone la discusión y comparación de las distintas técnicas y métodos empleados, que permitan diferenciar entre un álabe libre de fallas y un álabe que ha sido retirado de servicio.

1.6. Alcance del presente estudio

El alcance de este trabajo cubre el comportamiento mecánico del álabe, sin considerar las condiciones del vapor en movimiento. Si bien se presenta un modelo de elementos finitos, no se realiza un análisis computacional de dinámica de fluidos (CFD por sus siglas en inglés).

En el Capítulo 2 se describen los antecedentes del estudio de álabes de turbinas de vapor de la Central Nuclear Atucha I, se muestran los resultados de la aplicación de métodos de ensayos no destructivos y estudios metalográficos en álabes retirados de servicio que se hicieron en la división de Investigación Aplicada a Métodos de Ensayos No Destructivos (IAMEND).

En el Capítulo 3 se desarrolla el marco teórico de las distintas técnicas y métodos. Se expone el principio de funcionamiento de cada una de las técnicas de

medición empleadas en el desarrollo de esta tesis. Se describe el marco teórico del Método de Elementos Finitos (MEF) y las consideraciones que se emplean para estimar las frecuencias naturales de vibración de un álabe de sección variable.

En el Capítulo 4 se detalla el desarrollo experimental y la implementación de las distintas técnicas de ensayos no destructivos, incluyendo aquellas en las que se trabajó y no resultaron exitosas. Se presentan los resultados obtenidos con cada una de las técnicas.

En el Capítulo 5 se plantea la discusión a partir de los resultados obtenidos y también las sugerencias a tener en cuenta para estudios posteriores.

En el Capítulo 6 se muestran las conclusiones a las que se ha llegado en esta tesis.

2. ANTECEDENTES

2.1. Turbina de la Central Nuclear Atucha I

La Central Nuclear Atucha I (CNA-I) cuenta con un turbo-grupo de fabricación SIEMENS-KWU que consta de una etapa de alta presión y tres etapas de baja presión y tiene una longitud de 24 metros [23]. La turbina comenzó a construirse en el año 1969 y entró en operación en el año 1974 [35].



Figura 2.1. Turbo-grupo de CNA-I.

2.2. Datos técnicos de la turbina CNA-I

Una turbina de vapor básicamente consta de una parte móvil conocida como rotor y una parte fija la que se denomina estator. El rotor está comprendido por el eje, el disco tambor, los álabes rotatorios y otros elementos. El estator está conformado por la carcasa y por álabes estacionarios unidos a ella. Las características operacionales y de diseño que se detallan a continuación son una recopilación de la bibliografía [23]. En el caso de Atucha I, la construcción del rotor es de tipo monoblock, es decir que el eje y el disco tambor están forjados en una sola pieza, y en la periferia acanalada del disco se montan los álabes rotatorios. El material del eje corresponde al acero de baja aleación 25 NiCrMoV 11 5 [23]. La Tabla 2.1 especifica las características de diseño del turbo-grupo, mientras que los detalles adicionales de operación se encuentran en el Anexo A.

Tabla 2.1. Características de diseño del turbo-grupo de la CNA-I [23].

Potencia de diseño (rendimiento óptimo)	340 MW
Potencia máxima	340 MW
Velocidad de rotación	3000 RPM (50 Hz)
Presión de vapor vivo	0,4 MPa
Temperatura del vapor vivo	253°C
Vapor contenido	X =0,995
Secado del vapor @ Temp. vapor saturado = 154°C	X = 0,985
Margen de frecuencia admisibles	48,5 – 51,7 Hz
Temperatura del agua de refrigeración	17°C

El empaletado (disposición de los álabes o palas) se distribuye de la siguiente manera: 15 escalones en la etapa de alta presión y 11 escalones en la de baja presión. Un escalón es el conjunto formado por una rueda de álabes fijos y una de álabes móviles. Como se mencionó en el capítulo anterior, los componentes de interés en este estudio son los álabes rotatorios de la etapa de baja presión pertenecientes al último escalón. El material con el que se fabrican estos componentes es el acero AISI 420, cuyas propiedades mecánicas de interés y demás características se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas del acero AISI 420 [10].

Características y propiedades	AISI/ SAE 420
Tipo	Inoxidable martensítico
Densidad	7700 Kg/m ³
Módulo de elasticidad	200 Gpa
Coefficiente de Possion	0,3
Coefficiente de expansión térmica	11,5 $\mu\text{m}/(\text{m})(^{\circ}\text{C})$
Características magnéticas	Ferromagnético

Además de las características generales de la turbina ya mencionadas, se buscó información técnica que ayudara al desarrollo de esta tesis. Por ejemplo, se sabe que el escalón 11 de la turbina de baja presión cuenta con un empaquetado de 58 álabes rotatorios, los cuales están montados sobre el disco acanalado. El radio medido desde el eje del rotor hasta la base de la pala del álabe es de 687,2 mm.

2.3. Estudios previos referidos a la turbina de CNA-I

A continuación se presentan brevemente los diversos estudios que se han realizado en torno a la turbina de vapor de la CNA-I, desarrollados en diversos departamentos de CNEA.

El estudio de los componentes de la turbina surge a partir de la necesidad de prolongar la vida útil de las centrales nucleares. Es así que en el año 1995 se realizó una simulación del comportamiento del turbo-grupo ante una condición transitoria de rechazo de carga. Se denomina rechazo de carga a la desconexión del turbo-grupo de la red eléctrica. Esta condición no estacionaria puede llegar a provocar una aceleración de la turbina y afectar tanto a la turbina como al reactor [36].

Unos años más tarde se realizó un estudio para la evaluación de la integridad estructural del rotor de turbina, el cual comprende un análisis térmico tensional por el método de elementos finitos, cuyos resultados posteriormente se analizaron por mecánica de fractura [23].

Continuando el estudio de los componentes de la turbina de vapor, en el año 2003 se solicitó al grupo IAMEND el estudio no destructivo de dos álabes retirados de servicio durante una parada en el año 1999. Generalmente, las tareas de mayor relevancia en la turbina de vapor durante las paradas programadas consisten en la inspección de los álabes rotatorios, en especial los de las dos últimas filas en las tres etapas de baja presión, debido a los factores mencionados en el Capítulo 1, como condiciones de operación, ambiente húmedo, etc. Además se inspeccionan cojinetes y se realiza una revisión de regulación electrohidráulica [37]. Estos álabes formaban parte de una de las etapas de baja presión de la turbina (LP-3) y pertenecían al escalón 11. Los álabes corresponden a la numeración 15 y 53.

En ese estudio se emplearon técnicas no destructivas con las cuales se obtuvieron indicaciones que revelaron la presencia de fisuras, que fueron dimensionadas por metalografía no destructiva. Las conclusiones del trabajo fueron que las posibles causas de las fisuras encontradas son los mecanismos de corrosión bajo tensión o corrosión por fatiga, o una combinación de ambas, debido a la operación en un medio húmedo, tensiones propias de las condiciones de operación y tensiones residuales producto del tratamiento térmico de endurecimiento por flama que reciben los álabes en el borde de ataque. Los resultados detallados se encuentran en la bibliografía [7,9] y una parte de ellos se muestran a continuación en las Figuras 2.2a, 2.2b y 2.3 y en las Tablas 2.3 y 2.4.

Las Figuras 2.2a y 2.2b corresponden a los álabes n°15 y n°53 respectivamente. Las imágenes fueron adquiridas durante el ensayo de partículas magnéticas. Las fisuras se presentan en el borde de ataque y son pasantes en ambos casos. Las mismas se orientan en función del estado tensional en el borde de ataque del componente.

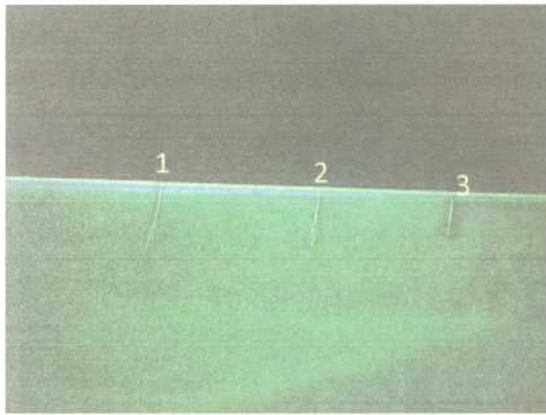


Figura 2.2a. Fisuras en el álabe nº 15.
Imagen lograda durante el ensayo de
partículas magnéticas con iluminación de
lámpara UV [7].

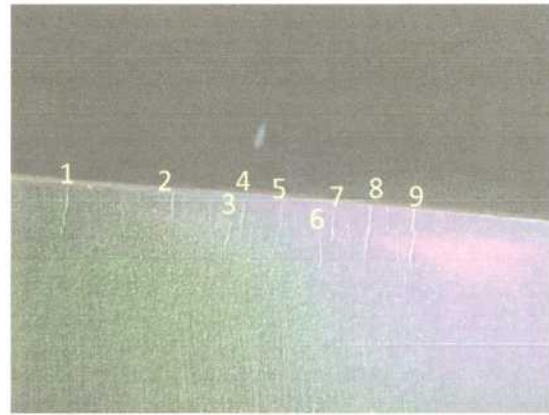


Figura 2.2b. Fisuras en el álabe nº 53.
Imagen lograda durante el ensayo de
partículas magnéticas con iluminación
blanca y de lámpara UV [7].

La Figura 2.3 corresponde a la microestructura del álabe nº 15. Esta imagen se obtuvo mediante la técnica de réplicas metalográficas. En ella se aprecia cómo la fisura avanza a través del borde de grano y se ramifica a medida que se interna en el álabe; el borde de ataque corresponde a la parte inferior de la figura. Se observa además la presencia de precipitados en los límites de grano.

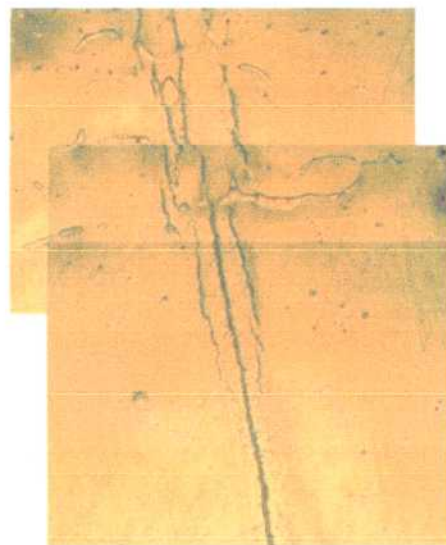


Figura 2.3. Vistas de diferentes partes de la fisura nº 1 del álabe 15 y se ilustra su ramificación [7].

Las Tablas 2.3 y 2.4 detallan las longitudes de las fisuras identificadas en cada álabe. Estas mediciones se realizaron con el uso de réplicas topográficas y observadas con una lupa con aumento de 10X [7].

Tabla 2.3. Mediciones de longitud de las indicaciones en el álabe N° 15 [7].

Fisura	Longitud [mm].
1	4,3 ± 0,1
2	4,3 ± 0,1
3	6,8 ± 0,1

Tabla 2.4. Mediciones de longitud de las fisuras en el álabe N° 53 [7].

Fisura	Longitud [mm].
1	5,7 ± 0,1
2	5,2 ± 0,1
3	6,1 ± 0,1
4	5,9 ± 0,1
5	4,4 ± 0,1
6	5,1 ± 0,1
7	6,2 ± 0,1
8	6,7 ± 0,1
9	7,4 ± 0,1

2.4. Estudios preliminares considerados en el desarrollo de la tesis

Siguiendo con el estudio de los álabes, se planteó un modelado computacional del álabe. Para ello se necesitó ingresar la geometría del mismo al pre-procesador. La información disponible en este aspecto era muy limitada, ya que sólo se contaba con el plano reducido (tamaño A4) y de muy baja resolución, que se muestra en la Figura 2.4. Se probaron entonces diversas técnicas para relevar el contorno del álabe, como el uso de mesas de coordenadas (gentileza Mitutoyo Argentina, Figura 2.5) y lecturas directas sobre una versión ampliada del plano (Figura 2.6).

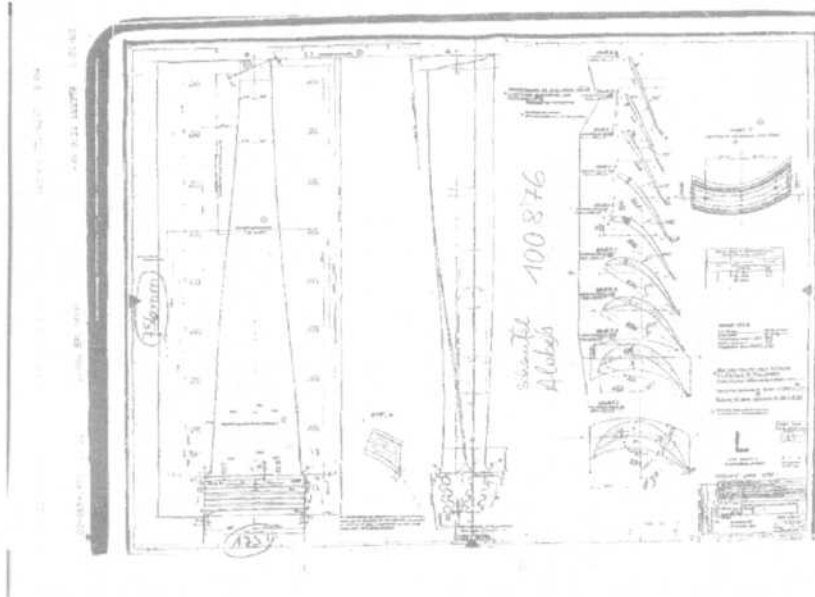


Figura 2.4. Plano del álabes con baja resolución.

Los resultados en ambas mediciones proporcionaron una gran cantidad de datos acerca del perfil y del contorno del álabes, sin embargo presentaban problemas como el desalineamiento entre los barridos de distintas direcciones y discontinuidades en las lecturas de los bordes, como se aprecia en las Figuras 2.5 y 2.6. Como parte del desarrollo de la tesis se plantea un método más eficaz que permita obtener la geometría del componente.

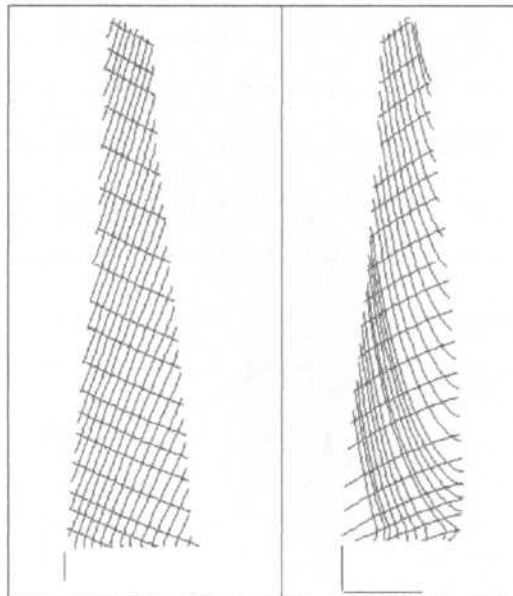


Figura 2.5. Escaneo del álabes con un palpador Mitutoyo.

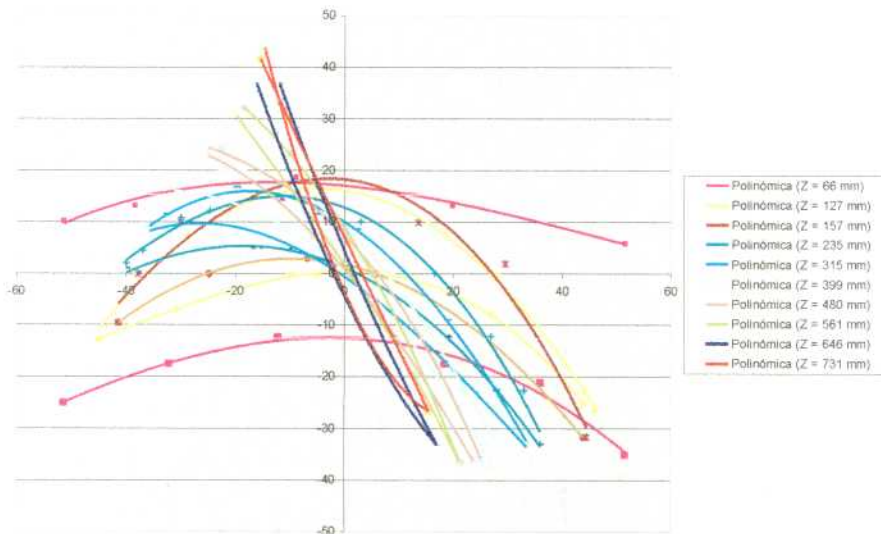


Figura 2.6. Cortes del álabes obtenidos a través del relevamiento del plano ampliado.

Mediciones a varias alturas indicadas a lo largo del eje de mayor longitud en el álabes [38].

2.5. Otros estudios

A la par del desarrollo de esta tesis, otros investigadores han realizado un estudio comparativo en cuatro álabes, tres de ellos estudiados en el presente trabajo. Los cuatro se estudiaron mediante el método de ruido magnético Barkhausen (RMB), utilizando como testigos dos álabes que no tenían uso previo. Los resultados fueron analizados y filtrados posteriormente para extraer las componentes energéticas de mayor relevancia. La técnica permitió determinar la máxima respuesta RMB y comparar las señales de los distintos álabes en función del ángulo de excitación. Si bien los resultados a los que se llega no son definitivos y aún se están analizando, se describen diferencias entre los álabes sin uso y los retirados de servicio [39].

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El análisis del comportamiento de álabes de turbina de vapor involucra un estudio interdisciplinario. Es necesario tener nociones acerca de vibraciones en componentes estructurales, métodos computacionales de cálculo y sistemas de medición que combinados permitan realizar un análisis modal del componente.

El análisis modal experimental es por definición, el proceso involucrado en el ensayo de componentes o estructuras con el objetivo de obtener una descripción matemática de su comportamiento dinámico o vibratorio [40].

En este capítulo se describe el principio de operación de los distintos métodos empleados para realizar este análisis modal experimental. El primero de los métodos ópticos utilizados, el escáner láser tridimensional, se aplicó en la adquisición de la geometría del componente; el otro, vibrometría laser Doppler, se utilizó en mediciones de oscilaciones; y por último, sensores de fibras ópticas, en medición de deformaciones. Dentro de los métodos tradicionales se usaron transductores piezoeléctricos (acelerómetros de contacto) como una técnica de medición de vibraciones. Por último se emplearon métodos computacionales y de cálculo para elaborar un modelo del componente.

3.1. Métodos ópticos

Los avances en las últimas décadas en electrónica y en los sistemas de adquisición de datos, junto con la disminución de los costos de equipamiento, han permitido el desarrollo de las técnicas ópticas dentro de los métodos de ensayos no destructivos e incursionar con una amplia variedad de aplicaciones en diversas industrias. A continuación se describen las técnicas ópticas utilizadas en esta tesis.

3.1.1. Escaneo láser tridimensional

Las técnicas de telémetros láser basada en triangulación y franjas de luz, junto a otras técnicas activas como luz estructurada, tiempo de vuelo, interferometría de moiré y escáneres láser, se emplean para medir sin contacto superficies en tres

dimensiones (3D). La última mencionada es una de las más aplicadas en diversos campos como medicina, robótica, gráficos computarizados, diseño industrial y sistemas de control de calidad asistidos por computadora.

La adquisición de la nube de puntos de una superficie en un escaneo láser se realiza mediante el principio de triangulación, el cual es empleado desde hace muchos siglos en cartas de navegación y en astronomía. Eratóstenes, usando la sombra producida por el sol, empleó este principio para medir la circunferencia de la Tierra más de 2000 años atrás.

De los varios sistemas de escaneos 3D revisados en la bibliografía, es de uso común el requerimiento de actuadores para trasladar y/o rotar el objeto o el plano láser [41,42], además de disponer de mecanismos externos de rastreo para determinar la posición y orientación del dispositivo láser en línea (on-line). El sistema aquí empleado no requiere el uso de actuadores ni mecanismos de rastreo. Utiliza la autocalibración en tiempo real de un plano formado por un láser ensanchado en una sola dirección, sostenido manualmente, que al intersecar dos superficies planas produce dos bandas en forma de “V”. Un simple análisis de estas bandas láser en las imágenes de la cámara completan la autocalibración, Figura 3.1.

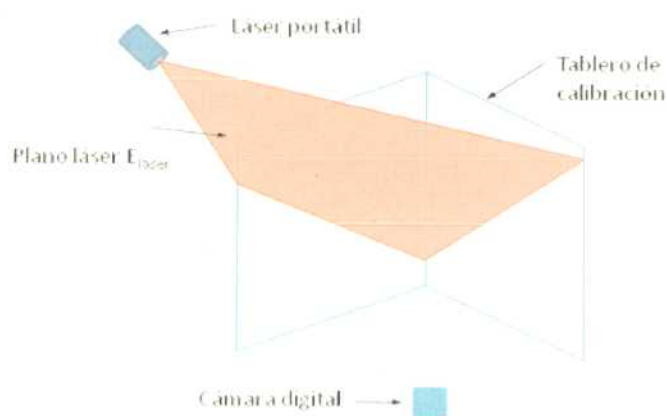


Figura 3.1. Sistema de autocalibración.

El sistema de escaneo láser tridimensional requiere de una cámara digital, un láser portátil que proyecta una línea, un tablero de calibración, una PC para el procesamiento de los datos y un software adecuado. En este caso se ha adquirido uno comercial: DAVID® Laserscanner. Como se mencionó anteriormente, la reconstrucción

de la superficie 3D se basa en el principio de triangulación, es decir, la utilización de la trigonometría para interpretar la intersección del plano láser con el objeto visto desde la cámara. La única condición previa que requiere el sistema es una geometría de fondo que sea conocida, la cual se emplea como patrón de calibración.

Escaneo láser portátil: La línea láser proyectada debe intersecar al mismo tiempo la superficie (desconocida) y la referencia geométrica previamente conocida. La intersección con el fondo se utiliza para la calibración del plano láser, $E_{\text{láser}}$, es decir calcula la posición exacta 3D de dicho plano, ver Figura 3.2. A partir de esto se pueden triangular nuevos puntos coordenados 3D de la superficie del objeto mediante la intersección con los rayos de proyección de la cámara, r . En pocas palabras se adquieren varios puntos coordenados de la línea láser visible mediante la intersección del fondo con los rayos de proyección de la cámara. Por lo tanto no es necesario un reposicionamiento ni recalibración de la cámara para obtener diferentes direcciones de observación, tan sólo basta con rotar el objeto [43].

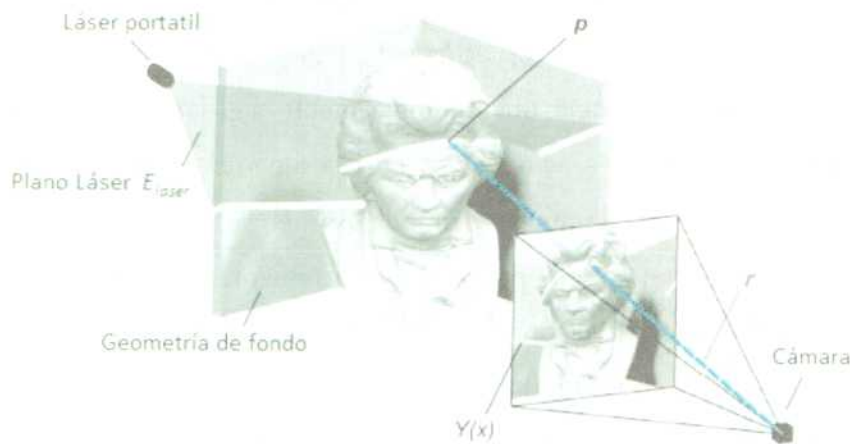


Figura 3.2. Triangulación láser: escena 3D e imagen de la cámara 2D. La intersección de una proyección de rayos r con el plano $E_{\text{láser}}$ resulta en un nuevo punto p en 3D.

Calibración láser on-line: Los grados de libertad del plano láser quedan restringidos debido a que los puntos de intersección son linealmente independientes. Se deben determinar de la manera más precisa posible las coordenadas de la línea láser en las imágenes de la cámara, I . Una manera de hacerlo es usar una imagen de referencia IR sin luz láser y calcular la diferencia $Id=I-IR$. Cuando la línea proyectada

es horizontal o vertical, el problema se reduce a la detección en una dimensión de la línea en una simple columna o fila de la imagen, respectivamente. Entonces se puede encontrar la línea con una exactitud de subpíxel mediante el cálculo de los promedios (ponderados) $Y(x)$ del “brillo” de las coordenadas del píxel en cada fila y columna. El siguiente paso es calcular la posición 3D del plano láser con el uso del algoritmo de RANSAC [44]. Este algoritmo genera aleatoriamente una hipótesis de probabilidad a partir del conjunto de datos de entrada. Repetitivamente selecciona tres píxeles aleatorios $Y(x_1)$, $Y(x_2)$, $Y(x_3)$, y se asume que pertenecen a la geometría de fondo. Calibrando previamente la cámara, se puede conocer la ecuación de los tres “rayos de luz” r_i para cada uno de los píxeles e intersecarlos con la geometría de fondo, obteniendo como resultado tres puntos de una superficie p_1 , p_2 , p_3 . Estos puntos linealmente independientes definen una posible posición del plano láser. Esta hipótesis se verifica evaluando el número de aciertos de $Y(x)$ como criterio de calidad [43].

Triangulación de puntos 3D: Considerando ahora el objeto a escanear y teniendo como datos conocidos la ecuación del plano láser y el número de píxeles de la imagen a partir de $Y(x)$, se puede obtener nuevamente la ecuación del “rayo de luz” r para cada uno de estos píxeles. Se puede obtener la superficie del objeto mediante la intersección $p = r \cap E_{\text{láser}}$. Durante el proceso de escaneo se pueden repetir barridos y volver a medir zonas con valores periféricos e incrementar la precisión donde sea posible. Esto conlleva a que el algoritmo obtenga varios puntos de la superficie para la misma imagen del píxel, los cuales deberán fusionarse usando promedios o algún filtro adecuado. Para obtener un modelo en 360° se debe escanear el objeto desde varias direcciones de observación [43].

Reconstrucción de la superficie: Cuando ya se han realizado los distintos escaneos desde las diferentes direcciones de observación para obtener el modelo en 360°, el siguiente paso es unir los escaneos. Para esto se calcula el vector normal n correspondiente a cada punto p de cada superficie. Se define como *punto orientado* a la combinación de un punto con su respectiva normal. Un contacto tangencial entre dos puntos orientados de distintas superficies significa que la coordenada del punto y

su respectiva normal coinciden. Asumiendo que dicho contacto ocurre sobre las superficies se puede construir una hipótesis de posición, cuya validez se discutirá en el siguiente párrafo. Si consideramos un par de puntos a una cierta distancia en cada escaneo y bajo el supuesto de que ambos sean coincidentes con la otra superficie, una cobertura exacta de ambos pares de puntos con normales opuestas es posible solo si sus distancias entre ellos y sus ángulos relativos son idénticos; a partir de lo expuesto se puede calcular el ángulo de rotación entre dos escaneos y realizar la reconstrucción [43].

Verificación de la hipótesis de posición: La hipótesis planteada anteriormente se debe medir en base a la calidad de aciertos. Esto implica una estimación del área de traslape entre dos escaneos, la que se realiza mediante la evaluación de la distancia entre las dos superficies. Para esto se considera que las superficies están en contacto en regiones donde la distancia entre dos puntos de dos superficies es menor que un valor predefinido [43].

3.1.2. Vibrómetro láser Doppler

Los métodos de medición sin contacto ofrecen muchas ventajas frente a los métodos tradicionales que emplean acelerómetros montados sobre la superficie. Este tipo de técnica no se ve afectada por las condiciones de la superficie, temperatura o presión, además de permitir el acceso a lugares que serían muy difíciles para las técnicas convencionales como ambientes con elevados niveles de tensión o radiación.

Los sistemas de medición láser Doppler se utilizan para medir cambios de posición, velocidad, pequeños cambios de frecuencia, etc. [45]. Un vibrómetro es un instrumento de medición que cuantifica oscilaciones mecánicas. El uso de técnicas láser Doppler para medir vibraciones en álabes de turbina y objetos en rotación se ha divulgado en últimos años [46].

A diferencia de los fenómenos de refracción, dispersión y difracción - en los cuales la luz interactúa con el ambiente físico - en la interferometría un haz de luz interactúa con otro haz de luz [47]. En este tipo de sistema se tendrá un haz de

referencia y un haz de medición. Existen algunos diseños de vibrómetros que emplean diferentes componentes para modular la frecuencia del haz de referencia, entre ellos el uso de sistemas de lentes controlados por piezoeléctricos, rejillas de difracción, rejillas óptico-acústicas de Bragg. Así mismo los diferentes diseños aplican diversos principios de funcionamiento, como el principio óptico homodino o el principio heterodino. Un esquema típico de un sistema de medición de vibraciones con una configuración de interferómetro heterodino se detalla en la Figura 3.3 [48].

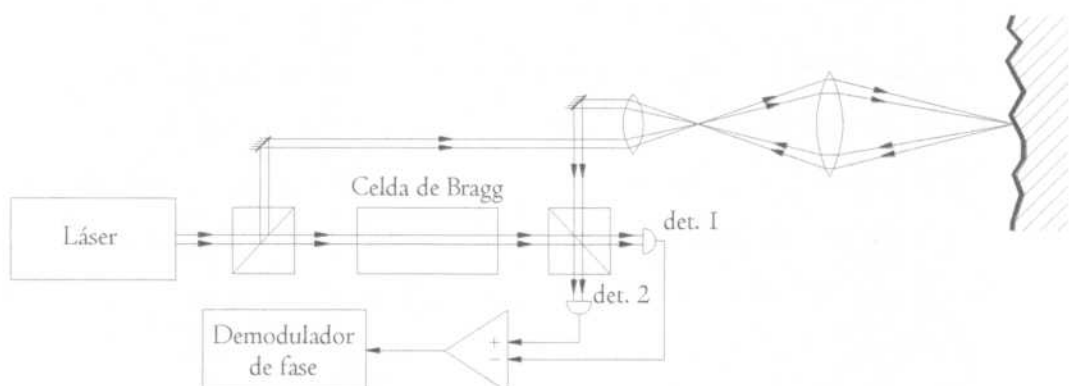


Figura 3.3. Esquema tradicional de un interferómetro heterodino [48].

En lo particular, la medición de la velocidad de vibración se realiza acorde al principio de interferometría heterodino [49], el cual genera un portador de señales de alta frecuencia en el fotodetector con la ayuda de una celda de Bragg. El haz de un láser Helio-Neón se orienta hacia el objeto que vibra, es dispersado y retorna hacia el detector. La velocidad y la amplitud del objeto que vibra generan una frecuencia o modulación de fase debido al efecto Doppler. De este modo el haz objeto se somete a un pequeño cambio de frecuencia, el cual se describe como frecuencia Doppler f_D . La frecuencia Doppler es función de la componente de la velocidad v en la dirección del haz objeto:

$$f_D = 2 \frac{v}{\lambda} \quad (3-1)$$

donde λ es la longitud de onda del láser. La celda de Bragg también genera un cambio de frecuencia óptica f_B en el haz de referencia. Luego de superponer el haz objeto y el

haz de referencia, una señal eléctrica se genera en el detector con una frecuencia instantánea

$$f_c(t) = f_B + f_D(t) = f_B + 2 \frac{v(t)}{\lambda} \quad (3-2)$$

Ésta es una señal portadora de frecuencia con centro en f_B , la cual es una frecuencia modulada con el signo de la frecuencia Doppler $f_D(t)$. La demodulación de la frecuencia Doppler se basa en un proceso digital, de manera que la exactitud de medición es virtualmente independiente de la influencia de vibraciones ambientales de baja frecuencia.

3.1.3. Medición de deformaciones con sensores de fibra óptica

Sin duda el área más grande de aplicación de las fibras ópticas está en el campo de las telecomunicaciones. Una de las principales razones de esto es la gran capacidad de transmitir información en un gran ancho de banda por kilogramo de cable. Al no ser un material conductor, las fibras son inmunes a la radiación electromagnética y pueden usarse en condiciones peligrosas de alta tensión. Estas propiedades son importantes para utilizar fibras ópticas como sensores [50].

Las fibras ópticas utilizadas como sensores miden cantidades que tienen influencia en la propagación de la luz en el interior de la fibra (sensores de fibra intrínsecos), o entre dos fibras (sensores de fibra extrínsecos). Generalmente, en la medición se utiliza un cambio en amplitud o fase de la luz, y con menor frecuencia, la longitud de onda o la polarización. Magnitudes tan diferentes como presión, temperatura, rotación, voltaje y campos eléctricos y magnéticos pueden ser medidas sin dificultad.

3.1.3.1. Estructura de la fibra óptica

Una fibra óptica es un material dieléctrico estándar, generalmente vidrio, que puede atrapar la radiación óptica en un extremo, confinarla y guiarla hacia el otro extremo. Normalmente, la fibra consiste de al menos dos materiales ópticamente diferentes. Geométricamente, la fibra es un cilindro de radio pequeño y de gran

longitud. La porción central, donde viaja la mayor parte de la luz, se denomina núcleo y tiene un índice de refracción n_1 . Rodeando al núcleo hay otro material dieléctrico con menor índice de refracción n_2 , al que se conoce como revestimiento o cladding, ver Figura 3.4. La luz atrapada dentro del núcleo viaja a lo largo de la fibra debido al fenómeno de la reflexión total interna que ocurre en la interfase entre el núcleo y el revestimiento ya que $n_1 > n_2$ [51].

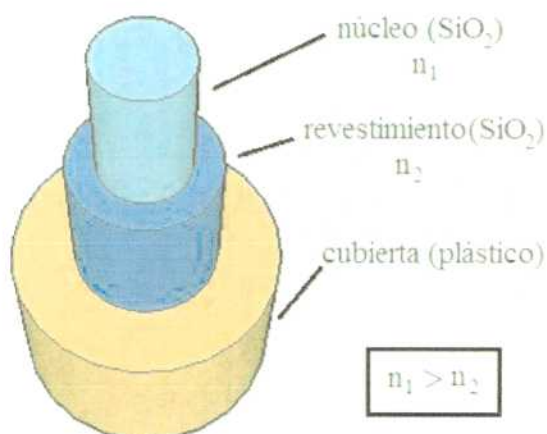


Figura 3.4. Estructura de la fibra óptica.

Una descripción geométrica simple permite mostrar un rango continuo de rayos reflejados hacia el interior del núcleo. De hecho, la luz (como onda) debe satisfacer una condición de autointerferencia para que sea atrapada en la guía de onda. Existe solamente un número finito de caminos que satisfacen esta condición, denominados modos. Las fibras que soportan un gran número de modos (aquellas cuyas apertura numérica y radio del núcleo son grandes) pueden ser analizadas adecuadamente con herramientas de óptica geométrica. Por el contrario, las fibras que soportan un pequeño número de modos deben ser caracterizadas resolviendo las ecuaciones de Maxwell con las condiciones de contorno apropiadas para la estructura.

Si el radio del núcleo de la fibra es suficientemente pequeño dada la longitud de onda de la luz, se propaga un solo modo. Para el rango visible, el diámetro del núcleo de estas fibras es aproximadamente $10\ \mu\text{m}$. Estas son las denominadas *fibras monomodo* [52].

3.1.3.2. Redes de Bragg en fibra óptica

Un sensor de fibra óptica con red de Bragg, FBG (por sus siglas en inglés *Fiber Bragg Grating*), es una estructura dada por una variación, periódica o no, del índice efectivo de refracción. Una celda de Bragg inscrita en una fibra óptica se puede construir mediante diversos métodos. La técnica más común se basa en la fotosensibilidad del núcleo de la fibra a la luz UV que genera un cambio estructural en ella y por lo tanto un cambio permanente en el índice de refracción. La fotosensibilidad del vidrio del núcleo depende fuertemente de la composición química y de la longitud de onda UV: los vidrios de sílice tienen una débil fotosensibilidad mientras que los vidrios germanosilicatos exhiben un efecto mucho más fuerte, haciendo posible un contraste en el índice de refracción por arriba de 10^{-3} [53].

El uso de este tipo de sensores es de última tecnología y se emplean en construcciones de edificios inteligentes que permiten un monitoreo permanente del estado de la estructura [54].

3.1.3.3. Principio de operación

Una red de Bragg en una fibra óptica es una perturbación periódica o no periódica del índice de refracción efectivo en su núcleo, Figura 3.5. Típicamente, la perturbación es aproximadamente periódica sobre una determinada longitud de, por ejemplo, unos pocos milímetros o centímetros, y el período es del orden de cientos de nanómetros, pudiendo excepcionalmente ser más larga.

Las fibras monomodo son de gran utilidad cuando se requiere muy alta sensibilidad en una medición. Con ellas es posible construir interferómetros de onda guiada. Como se vio en la sección 3.1.2, un interferómetro de dos haces compara la fase de una onda de luz que ha recorrido un camino de detección, con la fase de otra onda de luz proveniente de la misma fuente pero que llega desde un camino de referencia protegido. Una celda FBG funciona como un interferómetro de múltiples haces, como se esquematiza en la Figura 3.6, en el cual cada haz se origina desde un reflector diferente dentro de un conjunto de reflectores similares equiespaciados. Este reflector de red representa una variación periódica en el índice de refracción del

núcleo. En cada interfase entre dos regiones de diferente índice, ocurre una reflexión parcial de baja intensidad. La amplitud de la onda reflejada resultante se puede determinar mediante la superposición de las componentes individuales reflejadas [51,53].

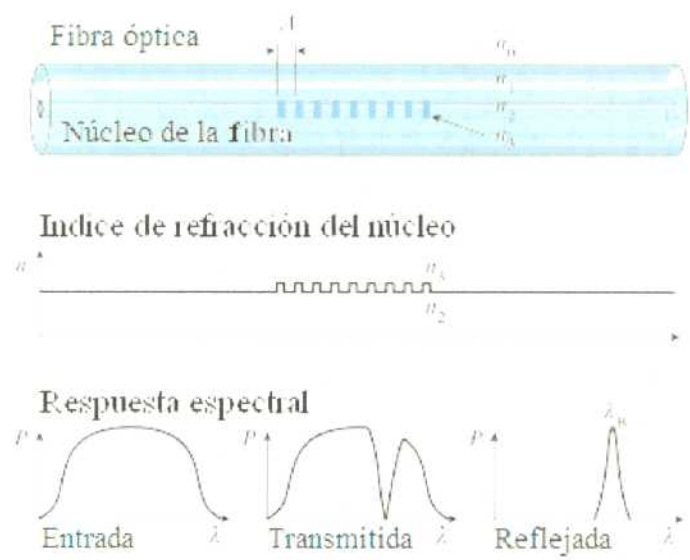


Figura 3.5. Estructura de una red de Bragg de fibra, perfil del índice de refracción y respuesta espectral.

La perturbación en el índice de refracción produce que la luz se refleje sólo para un rango estrecho de longitudes de onda (Figura 3.5 y 3.6) para las cuales se cumple la condición de Bragg:

$$\frac{2\pi}{\Lambda} = 2 \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \tag{3-3}$$

donde Λ es el período de la red, λ_B la longitud de onda de Bragg y n_{eff} es el índice de refracción efectivo del modo del núcleo. Despejando esta última, resulta

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{3-4}$$

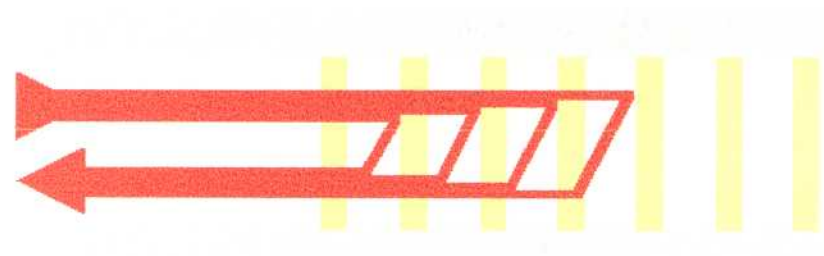


Figura 3.6. Interferómetro de múltiples haces [51]

El índice de refracción efectivo se define a través de la constante de propagación

$$\beta = n_{\text{eff}} \frac{2\pi}{\lambda_B} \quad (3-5)$$

cumpliendo ésta una función análoga al vector de onda o de propagación k . Nótese que el índice de refracción efectivo depende no sólo de la longitud de onda sino también del modo en el cual la luz se propaga. Por esta razón también se lo denomina índice modal. Cualquier cambio en este índice o en la frecuencia de la red de la fibra provocado por tensión o temperatura resultará en un cambio en la longitud de onda de Bragg.

Por ejemplo, ante una perturbación de deformación ó temperatura, la respuesta de deformación se debe a dos causas: primero la elongación física del sensor (cambio en el paso de la red) y segundo al cambio en el índice de la fibra debido al efecto fotoelástico.

Deformación [53]: el cambio de longitud de onda, $\Delta\lambda_{BS}$, para una deformación lineal $\Delta\epsilon$ aplicada está dada por

$$\Delta\lambda_{BS} = \lambda_B (1 - \rho_a) \Delta\epsilon \quad (3-6)$$

donde ρ_a es el coeficiente fotoelástico de la fibra, dado por

$$\rho_a = \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} - \rho_{12})] \quad (3-7)$$

donde los coeficientes ρ_{11} y ρ_{12} son las componentes del tensor deformación de la fibra óptica y ν su coeficiente de Poisson.

Temperatura [53]: para un cambio de temperatura ΔT , el correspondiente cambio de longitud de onda $\Delta\lambda_{BT}$ está dado por

$$\Delta\lambda_{BT} = \lambda_B (1 + \alpha) \Delta T \quad (3-8)$$

donde α es el coeficiente termo-óptico de la fibra.

3.2. Vibraciones

El tema a tratarse a continuación es bastante amplio por lo cual en lo posible, se buscará puntualizar en los temas de interés. Esta sección se encara partiendo de la definición del problema de las vibraciones libres no amortiguadas con su respectiva formulación y los métodos de cálculo que se emplean generalmente para encontrar su solución. Luego se trata el tema de la medición de vibraciones con sensores de contacto.

En la revisión bibliográfica se encontró información en la que generalmente se estudia el comportamiento de un álabe como una viga pre-curvada (desde la base a la punta) con sección transversal asimétrica montada sobre un disco rotatorio [19]. Han contribuido a la teoría de vibraciones Euler-Bernoulli, Stodola, Timoshenko, Reissner y otros más. Muchos estudios derivan soluciones al problema considerando individualmente aspectos como la disminución gradual de espesor, pre-curvatura, asimetría de la sección transversal y fuerzas centrífugas [55-58].

Esta tesis plantea el estudio del álabe como una viga precurvada de sección variable asimétrica empotrada en un extremo y libre en el otro, la cual se perturba y se deja vibrar libremente en condiciones de laboratorio. Desde el punto de vista matemático se tratará como un caso ideal de vibraciones libres no amortiguadas. Sin embargo en el análisis experimental del componente se tendrá en cuenta el amortiguamiento propio del material.

3.2.1. Vibraciones libres no amortiguadas

El movimiento de cualquier sistema estructural se puede expresar mediante una ecuación diferencial de segundo orden con múltiples grados de libertad. Esta ecuación representa el balance entre las fuerzas internas, las fuerzas externas y las fuerzas inerciales [59-62]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} + \{N\} + \{Q\} \quad (3-9)$$

$[M]$: Matriz de masas;

$[D]$: Matriz de amortiguamiento;

$[K]$: Matriz de rigidez;

$\{F(t)\}$: Vector función de fuerza;

$\{N\}$: Vector de fuerza no lineal relacionado a $\{u\}$ y $\{\dot{u}\}$;

$\{Q\}$: Vector de reacción de restricción de frontera;

$\{\ddot{u}\}$: Vector aceleración;

$\{\dot{u}\}$: Vector velocidad;

$\{u\}$: Vector desplazamiento.

La ecuación del álabe tratado como una viga en voladizo empotrada en la raíz, bajo las condiciones de no rotación y despreciando el amortiguamiento del material queda balanceada de la siguiente manera:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{0\} \quad (3-10)$$

Si asumimos que la solución a la ecuación es armónica, se podría expresar de la forma:

$$\{u(t)\} = \{X\} \sin \omega t \quad (3-11)$$

donde $\{X\}$ es el vector amplitud de la respuesta, la incógnita del problema.

Substituyendo esta última en la ecuación (3-10) se tiene:

$$([K] - \omega^2[M])\{X\} = 0 \quad (3-12)$$

Se puede expresar la solución del problema en función de los modos naturales de vibración. Considerando el "Principio de superposición" y haciendo la suposición de que todas las partes del sistema vibran sinusoidalmente con la misma frecuencia, la solución de la ecuación se obtiene mediante un problema de cálculo de autovalores y autovectores.

Utilizando el cambio de variable $\omega^2 = \psi$

$$([K] - \psi[M])\{\bar{X}_i\} = 0 \quad (3-13)$$

$$\text{o} \quad [K]\{\bar{X}_i\} = \psi [M]\{\bar{X}_i\} \quad (3-14)$$

donde ψ es el autovalor generalizado y $\{\bar{X}_i\}$ es el vector propio asociado.

Debido a que $\{\bar{X}_i\}$ es un vector diferente de cero, el determinante de $([K] - \psi[M])$ debe ser igual a cero

$$\det([K] - \psi[M]) = 0 \quad (3-15)$$

La ecuación (3-15) se denomina ecuación característica generalizada, la cual puede determinar los n autovalores generalizados $\psi_i (i=1, 2, 3 \dots, n)$. Las n frecuencias se pueden determinar mediante la ecuación (3-16), además del correspondiente $\{\lambda\}$.

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} = \sqrt{\psi_i} (i = 1, 2, 3 \dots, n) \quad (3-16)$$

3.2.2. Medición de vibraciones

La medición de vibraciones se puede categorizar en dos tipos. La primera, involucra mediciones discretas en algún punto determinado de una estructura, como por ejemplo el uso de acelerómetros o transductores de vibración. La segunda, mediciones espaciales sobre toda una superficie, como patrones de interferometría holográfica o speckle [46]. En esta sección nos referiremos a la primera categoría.

3.2.2.1. Ensayo de impacto

Una prueba de impacto es un tipo de prueba de vibración en la cual se aplica un golpe o un desplazamiento inicial a la estructura para que vibre libremente; se realiza normalmente en una máquina o estructura que no está en operación. Para la recolección de datos se instrumenta la estructura con transductores de vibración. La estructura responderá al impacto con una vibración que se extinguirá y las señales de los transductores se almacenan y se envían a un analizador de espectro. El espectro resultante contendrá picos que corresponden a las frecuencias naturales o "resonancias" de la máquina o componente [59, 63].

Además del registro de vibraciones libres que se obtienen en el ensayo de impacto, se puede obtener el factor de amortiguamiento correspondiente a la estructura.

3.2.2.2. Amortiguamiento

Cuando un material se deforma, parte de su energía es absorbida y disipada por el material. Este efecto se debe a la fricción entre planos internos que se deslizan conforme ocurre la deformación. La energía vibratoria se transforma en calor o sonido.

Debido a la reducción de energía, las respuestas del sistema tales como la deformación y la oscilación, disminuyen gradualmente [64]. En la Figura 3.9 se muestran las vibraciones libres de una barra empotrada que tiene bajo amortiguamiento y alcanza a efectuar muchos ciclos de oscilación antes de detenerse.

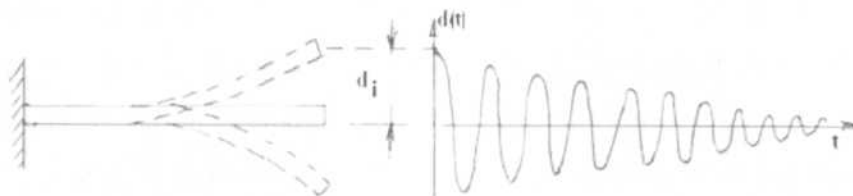


Figura 3.9. Vibraciones libres de una barra amortiguada. $d(t)$ =desplazamiento vibratorio después de deformar la barra desde su posición de reposo y dejarlo vibrar libremente

Se llama **amortiguamiento crítico** C_c al mayor valor del coeficiente de amortiguación (C) para el cual todavía se producen vibraciones libres. Si el coeficiente de amortiguación C es mayor que este valor, ya no se generan vibraciones libres. El amortiguamiento se expresa generalmente a través del **factor de amortiguamiento** ξ , definido como: $\xi = C/C_c$. Si $\xi < 1.0$, se generan vibraciones libres. Si $\xi > 1.0$ no se generan vibraciones libres y el sistema está sobre amortiguado.

A partir del registro de las formas de onda (desplazamiento, velocidad o aceleración) de las vibraciones libres se puede determinar el decremento logarítmico, δ , definido como:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{A_0}{A_n} \right) \quad (3-17)$$

$$\xi = \delta / 2 \pi \quad (3-18)$$

δ = decremento logarítmico;

n = número de ciclos de vibración considerados;

A_0 = amplitud de la vibración del primer ciclo tomado;

A_n = amplitud de la vibración después de n ciclos.

Reescribiendo (3-18) se tiene:

$$\xi = \frac{1}{2\pi n} \ln \left(\frac{A_0}{A_n} \right) \quad (3-19)$$

3.2.2.3. Transductores piezoeléctricos

Uno de los métodos empleados para medir vibraciones es el uso de transductores sobre la zona de interés. El transductor mayormente empleado es el acelerómetro piezoeléctrico. En éstos, el elemento piezoeléctrico se comprime por una masa sísmica sujeta al otro lado por un muelle y todo el conjunto dentro de una carcasa metálica, ver Figura 3.10. Al someter el conjunto a vibración, se aplica una fuerza variable sobre el disco piezoeléctrico, proporcional a la aceleración de la masa. Como respuesta, el piezoeléctrico desarrolla una carga eléctrica variable proporcional a la aceleración [63].

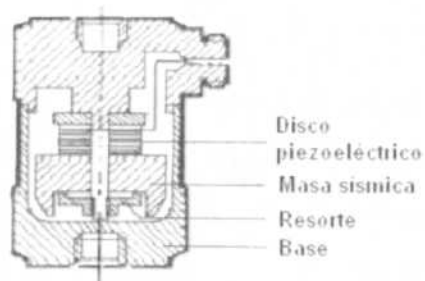


Figura 3.10. Esquema de un acelerómetro piezoeléctrico [63].

La adquisición de datos se realiza mediante una computadora y la configuración del software PULSE®. La respuesta de los acelerómetros se obtiene en el dominio del tiempo y a partir de ésta se puede determinar el coeficiente de amortiguamiento. Con el uso de la Transformada Rápida de Fourier, FFT por sus siglas en inglés, la respuesta se transforma en el dominio de la frecuencia y de esta manera se encuentran las frecuencias de resonancia propias de la estructura.

3.3. Métodos computacionales. Método de Elementos Finitos (MEF)

El análisis por elementos finitos es una técnica numérica basada en el cálculo computacional que permite obtener soluciones numéricas de problemas matemáticos e ingenieriles complejos. Esta técnica se basa en la construcción de un modelo geométrico-matemático de una estructura con un número finito de nodos y elementos individuales. Una vez que se ha creado el modelo con elementos discretos, se utilizan técnicas matemáticas para obtener un conjunto de ecuaciones de equilibrio para cada

elemento del modelo. Mediante la aplicación de diversas condiciones de contorno y cargas, la solución del conjunto simultáneo de ecuaciones proporciona las deformaciones y tensiones resultantes en cualquier parte del modelo sin dejar de ofrecer continuidad y equilibrio [65].

La utilidad y exactitud de esta poderosa herramienta de análisis estructural depende de la capacidad de reproducir modelos precisos y realistas de componentes que no se puedan analizar empleando las técnicas tradicionales. La limitación generalmente se debe a la memoria y velocidad de cómputo de las computadoras disponibles ya que los modelos constan de geometrías complejas con miles de nodos y elementos como se muestra en el ejemplo de la Figura 3.11.

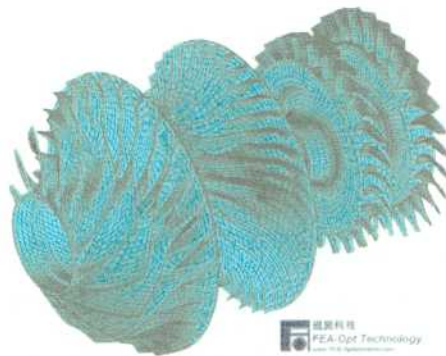


Figura 3.11. Modelo de turbina de gas [66].

3.3.1. COSMOS/M – Análisis en frecuencia

El programa de elementos finitos COSMOS/M se usa frecuentemente para resolver problemas lineales estáticos, pandeo, frecuencias naturales y formas modales. El sistema consta de un pre y pos-procesador. El pre-procesador es el que permite la construcción geométrica del modelo, definición de materiales, tipos y características de elementos y la aplicación de cargas. El procesador se ocupa de encontrar la solución del problema planteado, mediante un algoritmo adecuado al tipo de problema a resolver. El post-procesador es la herramienta utilizada para la presentación e interpretación de resultados, generalmente a través de tablas y gráficos

El módulo de análisis modal o normal en la etapa “procesador” del COSMOS/M permite el cálculo de las frecuencias y formas modales del modelo. El programa resuelve el sistema de ecuaciones de elementos finitos para un sistema dinámico correspondiente a una estructura lineal elástica no amortiguada la cual se perturba inicialmente y oscila indefinidamente, ecuación (3-12). Las formas de oscilación son llamadas formas modales y corresponden a las llamadas frecuencias naturales.

$$([K] - \omega^2[M])\{X\} = 0$$

La ecuación nos lleva a un problema de autovalores; el programa tiene cuatro opciones para el cómputo de autovalores:

- Iteración subespacial.
- Método de Lanczos.
- Método de Jacobi.
- Método potencia inversa.

La configuración por defecto del programa realiza el cómputo aplicando el primer método. La iteración subespacial es un método de extracción de valores propios, donde las iteraciones se realizan en un subespacio q -dimensional. El número de vectores de iteración de partida q es siempre más grande que el número de autovalores y autovectores p que van a ser calculados ($q > p$). Este método se detalla en la bibliografía [67].

Los elementos empleados para construir los modelos geométricos fueron los siguientes:

- **Elemento BEAM3D:** Elemento elástico de viga tridimensional con dos o tres nodos y grados de libertad traslacionales, Figura 3.12 izquierda. Se puede definir como una viga de sección transversal simétrica, asimétrica o simétrica con reducción gradual de espesor. Las propiedades del material del elemento se asocian a un comportamiento isotrópico, la masa puede ser distribuida o concentrada y se pueden aplicar cargas mecánicas, térmicas y gravitatorias.

- Elemento TETRA4R:** Elemento sólido tetraédrico de cuatro nodos con grados de libertad traslacionales y rotacionales, Figura 3.12 derecha. Las propiedades del material del elemento se pueden asociar a un comportamiento isotrópico, anisotrópico u ortotrópico. La masa puede ser distribuida o concentrada y se pueden aplicar cargas mecánicas, térmicas y gravitatorias.

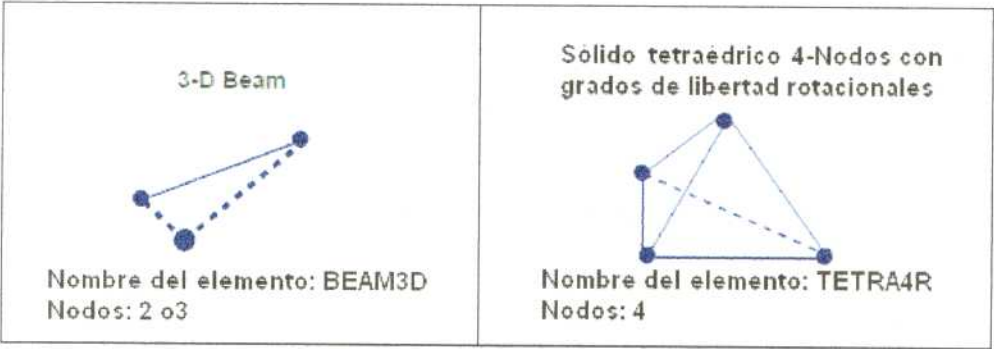


Figura 3.12. Elementos empleados para modelar con elementos finitos BEAM3D y TETRA4R.

Las propiedades físicas y mecánicas del material que se deben considerar en el modelo para realizar el análisis en frecuencia se detallan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades físicas y mecánicas del material requeridas para el modelo [67].

Propiedad	Descripción	Unidades
DENS	Densidad de masa	Masa/volumen
EX, EY, EZ	Módulo de elasticidad en las direcciones X, Y, y Z	Fuerza/área
GXY, GXZ, GYZ	Módulo de corte, en las direcciones X-Y, X-Z y Y-Z	Fuerza/área
NUXY	El coeficiente de Poisson, tensión en la segunda dirección del material debido a la deformación unitaria en la primera dirección del material	Adimensional
NUXZ	El coeficiente de Poisson, tensión en la tercera dirección del material debido a la deformación unitaria en la primera dirección del material	Adimensional
NUYZ	El coeficiente de Poisson, tensión en la tercera dirección del material debido a la deformación unitaria en la segunda dirección del material	Adimensional

3.3.2. Propiedades elásticas del material

Se dice que el comportamiento de un material es elástico lineal cuando su desplazamiento es linealmente proporcional a la carga aplicada y retorna a su estado no deformado al quitar la carga. Para materiales elásticos lineales, sin considerar la deformación térmica, el esfuerzo es proporcional a la deformación y se cumple:

$$\{\sigma\} = [K]\{\varepsilon\} \quad (3-20)$$

donde $[K]$ es la matriz de rigidez o de constantes elásticas del material (isotrópico, anisotrópico u ortotrópico), $\{\sigma\}$ es el vector tensión total y $\{\varepsilon\}$ es el vector deformación total. La ecuación anterior es una aproximación y se cumple cuando las deformaciones son pequeñas y para ciertos tipos de materiales. La forma inversa de escribir la ecuación es:

$$\{\varepsilon\} = [C]\{\sigma\} \quad (3-21)$$

donde $[C]$ representa la matriz de complianzas y es la inversa de la matriz $[K]$. Las ecuaciones (3-20) y (3-21) se conocen como relaciones constitutivas de los materiales lineales elásticos.

Si las propiedades de un material no varían con la dirección, entonces se dice que es un material isotrópico. Por lo tanto tienen idéntico módulo elástico, coeficiente de Poisson, etc., en cualquier dirección. Con el fin de definir las propiedades elásticas isotrópicas, se emplea la siguiente relación:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (3-22)$$

donde

E : Módulo de elasticidad.

ν : Coeficiente de Poisson.

G : Módulo de corte

Las relaciones esfuerzo-deformación para materiales isotrópicos que se aplican a cada elemento del modelo se escriben de la siguiente forma:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3-23)$$

donde

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ y τ_{zx} son las componentes del tensor de tensiones

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}$ y γ_{zx} son las componentes del tensor deformación.

3.4. Flexión en vigas

Los esfuerzos normales producidos por el momento flector se llaman esfuerzos de flexión y las relaciones entre estos esfuerzos y el momento flector se expresan mediante la fórmula de flexión, la que se presenta al final de esta sección.

Cuando una viga flexiona debido a las fuerzas exteriores que se aplican, existen algunas partes de la viga que se acortan y otras que se alargan. Las que se acortan están en compresión y las que se alargan se encuentran sometidas a tensión o tracción. Pero hay una superficie, denominada neutra, que no varía. Esta superficie no está sometida a esfuerzo alguno y en un material homogéneo pasa por el centroide de la sección transversal [68].

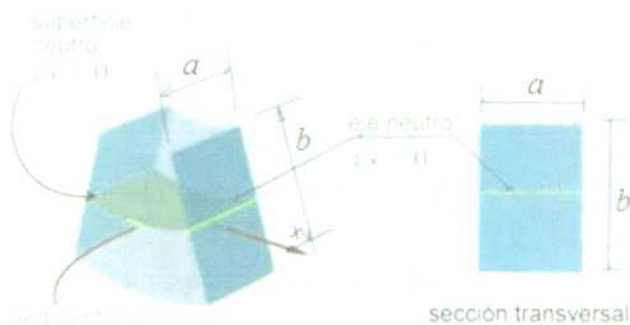


Figura 3.13. Deformaciones de flexión. Superficie neutra.

Pequeñas deformaciones

Las hipótesis para analizar las pequeñas deformaciones son las siguientes:

- El material es homogéneo y obedece a la ley de Hooke. Los esfuerzos no deben sobrepasar el límite de proporcionalidad o zona elástica del material.
- La barra tiene una longitud L mucho mayor que las dimensiones de su sección transversal, y la deformación debida a su propio peso es despreciable.
- La viga es inicialmente recta y de sección constante. Cuando el espesor de la barra es pequeño comparado con el radio de curvatura, la sección transversal cambia muy poco.

Consideremos una barra delgada de longitud L en posición horizontal, empotrada por un extremo y sometida a una carga vertical P en el extremo libre. Las secciones ac y bd giran una con respecto a la otra un pequeño ángulo $d\theta$, pero permanecen planas y sin distorsión, Figura 3.14. La deformación de una sección cualquiera gh situada a una distancia y de la superficie neutra, está dada por su alargamiento hk o δ , dado por:

$$\delta = hk = yd\theta \quad (3-24)$$

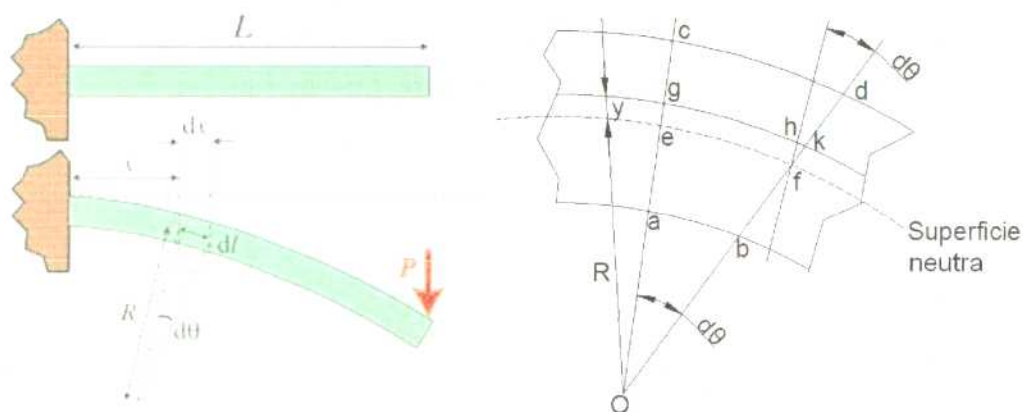


Figura 3.14. Viga en voladizo. Deformaciones.

La deformación ϵ se obtiene dividiendo el alargamiento por la longitud inicial

gh

$$\epsilon = \frac{\delta}{gh} = \frac{yd\theta}{ef} \quad (3-25)$$

Llamando R al radio de curvatura de la superficie neutra, la longitud ef es igual $Rd\theta$, por lo que la deformación unitaria resulta:

$$\epsilon = \frac{yd\theta}{Rd\theta} = \frac{y}{R} \quad (3-26)$$

Dado que el material es homogéneo y obedece la ley de Hooke, el esfuerzo en la sección gh esta dado por:

$$\sigma = E \epsilon = \left(\frac{E}{R} \right) y \quad (3-27)$$

Esta expresión indica que el esfuerzo en cualquier sección es directamente proporcional a su distancia y a la superficie neutra. Para completar la fórmula de flexión aplicamos las condiciones de equilibrio de fuerzas y momentos, obteniendo:

$$M = \frac{EI}{R} \quad (3-28)$$

donde I es el momento de inercia de área con respecto al eje de referencia, que en este caso es el eje neutro que pasa por el centroide y M es el momento flector provocado por la carga P . Reescribiendo (3-28) se tiene:

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \quad (3-29)$$

Puesto que la curvatura es el recíproco del radio, la ecuación (3-29) indica que la curvatura es directamente proporcional al momento flector. Utilizando la ecuación (3-27), la fórmula de flexión resulta:

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (3-30)$$

Esta ecuación indica que el esfuerzo debido a la flexión en cualquier sección es directamente proporcional a la distancia del punto considerado a la línea neutra. Sustituyendo y en la fórmula de flexión por el elemento más alejado de la línea neutra, c , se obtiene el esfuerzo máximo:

$$\sigma_{\max} = \frac{Mc}{I} \quad (3-31)$$

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

4.1. Escaneo láser tridimensional

Debido a los escasos resultados en la adquisición de la geometría del álabe mostrados en el Capítulo 2, se propuso realizar el relevamiento de la geometría utilizando un escáner láser 3D. El escaneo láser tridimensional es una técnica de medición sin contacto de las superficies de objetos y su reconstrucción en 3D. Ha sido inicialmente desarrollado para aplicaciones industriales, pero se ha ampliado su uso que actualmente va desde la industria del entretenimiento, la arquitectura, la arqueología, hasta la investigación policial. Hay una gran variedad de escáneres láser 3D, en precio y complejidad tecnológica. El utilizado en esta tesis es de los más sencillos y puede ser de bajo costo, dependiendo de los componentes utilizados. Se detalla a continuación el dispositivo experimental, el procedimiento seguido y los resultados que se obtuvieron con el método aplicado.

4.1.1. Equipamiento empleado

El equipamiento empleado es el siguiente y parte de él se muestra en la Figura 4.1:

- “Corner” esquina o tablero de calibración que forme 90°
- Láser He-Ne. Potencia 5 mW
- Lámina de lentes cilíndricas
- Cámara digital
- Software comercial: DAVID® Laserscanner
- Computadora personal (PC)

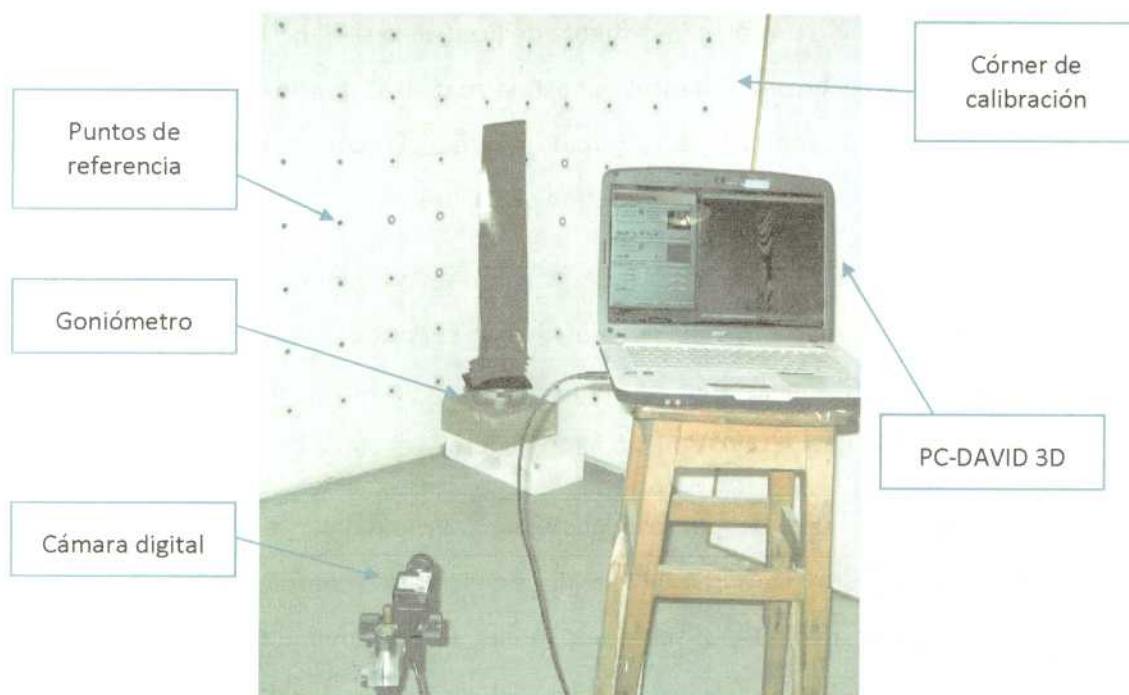


Figura 4.1. Equipamiento empleado para escanear el álabe.

4.1.2. Procedimiento

Para realizar el barrido o escaneo con la luz láser, es necesario que ésta se “estructure” de manera que al incidir sobre una superficie plana proyecte una línea. Al pasar por la lámina de lentes cilíndricas el haz láser se expande en una sola dirección. De esta manera se obtiene la proyección de una línea adecuada para realizar el escaneo.

Un elemento del dispositivo experimental que se tuvo que acondicionar fue el tablero de calibración. Éste debió ser de un tamaño apropiado para las dimensiones del álabe, de manera que desde la cámara se pudieran ver ambos, el álabe y el tablero. Para llevar a cabo el escaneo se realizaron los siguientes pasos:

1. Calibrar la cámara de acuerdo con los requerimientos del programa DAVID. Primero se coloca la cámara delante del tablero de calibración, de manera que el patrón de puntos sea completamente visible en la imagen de la cámara. Se puede realizar una calibración automática cuando se tiene una imagen de alto contraste, esto se consigue cambiando la configuración de la cámara (enfoque,

brillo, etc.) y/o cambiando la fuente de luz. Luego se debe colocar la escala del patrón de calibración. La escala se define como la distancia más corta entre dos puntos de referencia en el tablero. Por último el reconocimiento de los puntos de referencia por parte del algoritmo de calibración.

2. Colocar el álabe en la posición de escaneo: se lo asienta sobre un goniómetro, el cual permite rotar el álabe en un ángulo conocido. Antes de empezar con el barrido de la línea láser, se toma una foto de la escena con el objeto en posición, lo que permitirá luego darle textura al escaneo resultante.
3. Adquirir la nube de puntos del objeto barriendo con el láser. Los datos, recolectados on-line utilizando el principio de triangulación activa, se pueden observar en tiempo real sobre la pantalla de una computadora. Esto permite repasar zonas en donde se obtienen datos periféricos o donde la adquisición fue escasa. El programa representa la adquisición de datos a través de curvas de nivel de la superficie escaneada, Figura 4.2.
4. Una vez completada la adquisición de datos del objeto orientado en su posición inicial, se lo rota sobre su eje de mayor longitud las veces que sea necesario y se repiten los pasos 2 y 3.
5. Al finalizar los barridos con las distintas posiciones del álabe, se dispone de un conjunto de nubes de puntos, Figura 4.3. Para unir los distintos escaneos, el programa ejecuta dos algoritmos. El primero calcula el ángulo de rotación de uno de los escaneos considerando un contacto tangencial entre dos puntos orientados de distintas superficies; es decir que al rotar uno de los escaneos, las coordenadas de los puntos y sus respectivas normales coinciden. El segundo mide la calidad de los aciertos en las zonas que quedan traslapadas en el proceso de reconstrucción.

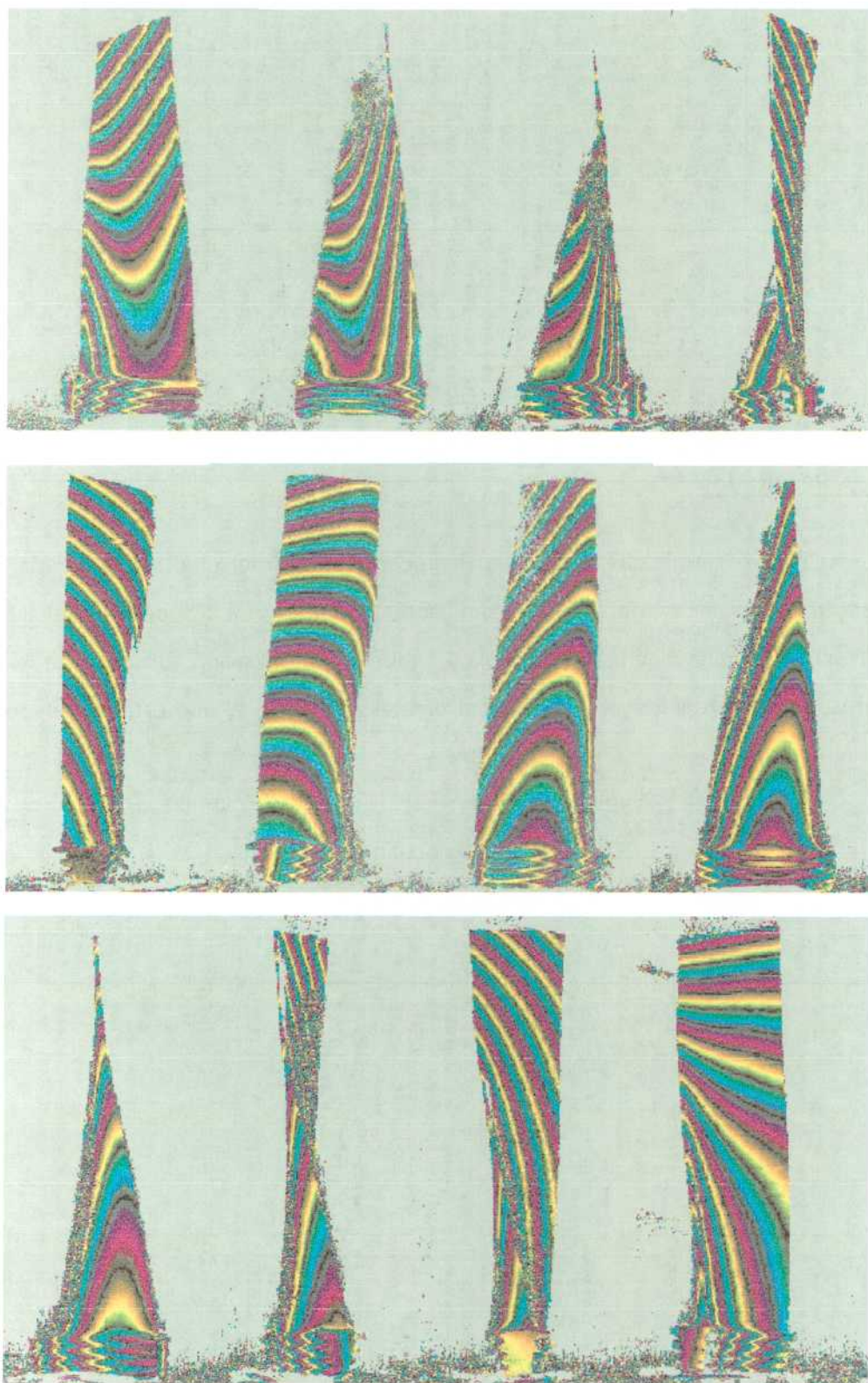


Figura 4.2. Adquisición de datos en tiempo real. Curvas de nivel de los distintos escaneos del álabes, rotados cada 30°.



Figura 4.3. Conjunto de Nubes de puntos del álabe rotado cada 30°.

4.1.3. Resultados

Una vez terminado el proceso de reconstrucción del objeto a partir de los diferentes escaneos, se obtiene una gran cantidad de datos de la superficie del álabe, representados en la Figura 4.4. La Tabla 4.1 muestra información adicional acerca de los resultados obtenidos: el volumen del paralelepípedo en el que está contenido el álabe.



Figura 4.4. Resultado del escaneo del álabe rotatorio de turbina de vapor de tercera etapa de CNA-I.

Tabla 4.1. Detalles del modelo 3D una vez finalizado el proceso de reconstrucción

Dimensiones aproximadas	123,3 mm x 753,1 mm x 178,8 mm
Vértices	165518
Triángulos	331034

4.2. Modelado del álabe con elementos finitos

El uso de herramientas de cálculo como el MEF permite obtener una estimación de las frecuencias naturales de vibración de un álabe y las formas modales correspondientes. Una vez obtenida la geometría del componente, el siguiente paso es introducirla en el pre-procesador para su posterior análisis.

Se estudiaron dos modelos:

El primero consistió en considerar el álabe como una viga recta de sección variable, con la misma longitud, en voladizo.

El segundo consideró la verdadera geometría del álabe, relevada con el programa 3D.

Este programa proporciona una gran cantidad de datos, pero sólo de la superficie. Para el análisis con el MEF se necesitan elementos sólidos. Para transformar la superficie cerrada del álabe en un sólido macizo, se complementó la información obtenida a partir del escaneo láser con las mediciones presentadas en la Figura 2.6. La compatibilización de toda esta información demandó mucho esfuerzo debido a que fue necesario utilizar varios programas (MeshLab-Autocad-SolidWorks) para poder obtener un formato compatible con el software COSMOS/M. La Figura 4.5 muestra las secciones que se extrajeron a partir de los datos obtenidos con el escaneo tridimensional.

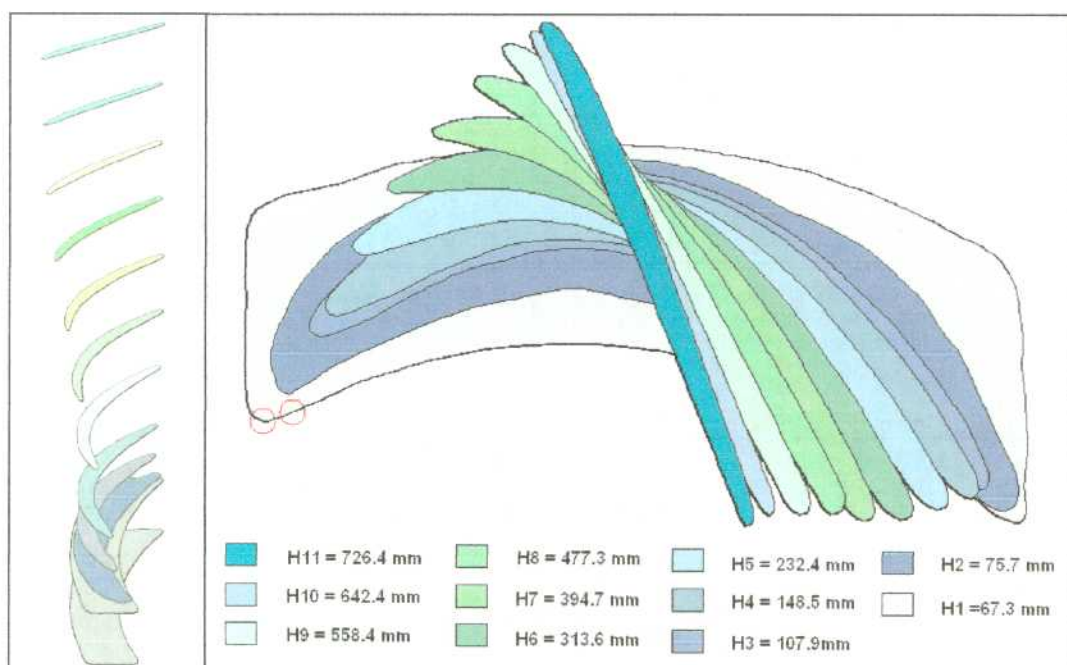


Figura 4.5. Cortes obtenidos del escaneo a las alturas indicadas.

4.2.1. Modelo de viga en voladizo

4.2.1.1. Construcción del modelo empleando elementos de viga BEAM3D

En una primera estimación de los modos de vibración del álabe utilizando el MEF, se consideró al mismo como una viga recta de sección rectangular variable, con la misma longitud en voladizo. La sección transversal de la viga reduce gradualmente su tamaño tanto en ancho como en espesor. Se la dividió por tramos a lo largo de la longitud; cada tramo está comprendido entre dos secciones transversales. A cada tramo se le asignó un elemento BEAM3D de dos nodos (ver Figura 3.12 izquierda). Se calcularon las superficies transversales y los momentos de inercia de los cortes de la Figura 4.5 empleando el programa SolidWorks y a partir de estos se calcularon el ancho y el espesor correspondientes a la viga de sección rectangular. Dichas secciones rectangulares fueron asignadas a cada nodo acorde a la altura del corte. El resultado fue la representación en forma de una línea con las propiedades geométricas del elemento en 3D. Los valores de la geometría en cada sección empleada en el modelo de MEF se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores de la geometría empleados en el modelo MEF del álabe de turbina.

# sección	Altura de corte [m]	Área del sector [m ²]	Momento de inercia del sector [m ⁴] 10 ⁻⁶	
			I_y	I_z
0	0	0,008663	-	-
1	0,067	0,008663	229,990	238,085
2	0,108	0,002768	435,346	511,234
3	0,148	0,002302	318,117	401,110
4	0,232	0,001801	168,070	282,772
5	0,314	0,001456	838,770	208,347
6	0,395	0,001250	373,206	158,647
7	0,477	0,001027	124,399	123,177
8	0,558	0,000913	589,597	105,967
9	0,642	0,000708	235,237	753,909
10	0,726	0,000671	196,255	720,793

Se consideró que las propiedades del material son las mismas a lo largo de todo el álabe; la densidad del acero martensítico AISI 420 es de 7700 kg/m³ y el módulo de elasticidad E del acero AISI 420 es de 200 GPa según la Referencia [10].

Para definir las condiciones de contorno de acuerdo al vínculo del álabe sobre el eje de la turbina de vapor, se lo consideró como empotrado en el tramo comprendido entre las secciones 0–1, correspondientes a la raíz [69].

La Figura 4.6 presenta el modelo simplificado generado para el álabe de turbina. El modelo consta de 295 nodos y 294 elementos distribuidos a lo largo de la viga.

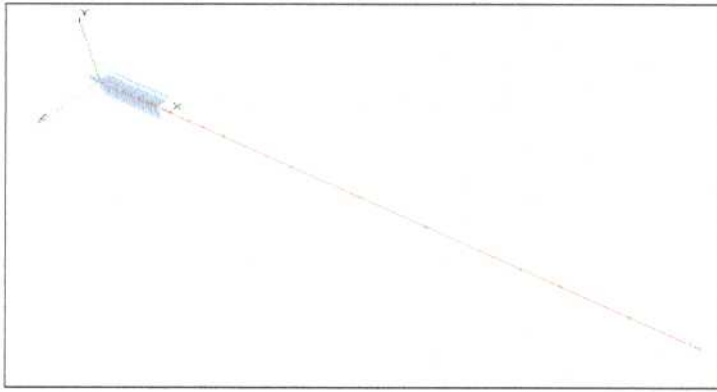


Figura 4.6. Modelo simplificado del álabes de turbina de vapor de la CNA-I.

Para el cálculo de las frecuencias naturales, el programa COSMOS/M emplea su módulo de análisis modal en el que resuelve un sistema de ecuaciones de elementos finitos. El modelo corresponde a una estructura lineal elástica no amortiguada que se perturba y vibra libremente. Bajo las consideraciones de que el material tiene un comportamiento lineal elástico y que sus propiedades no varían con la dirección, cada elemento del modelo satisface las relaciones esfuerzo-deformación para materiales isotrópicos que se mostraron en el Capítulo 3. El sistema de ecuaciones se resuelve mediante el cálculo de autovalores empleando el método de iteración sub-espacial. Estas consideraciones también son válidas para el modelo presentado en la próxima sección.

4.2.1.2. Resultados

La Tabla 4.3 presenta los resultados obtenidos con el modelo MEF simplificado del álabes en cuestión, correspondientes a las cuatro primeras frecuencias naturales de vibración. Las formas modales de los cuatro primeros modos naturales de vibración se presentan en las Figuras 4.7 hasta 4.10.

Tabla 4.3. Frecuencias naturales de vibración del álabe de turbina de vapor.

Modos (n)	Frecuencia [Hz]
1	63,8
2	209,2
3	369,5
4	481,2

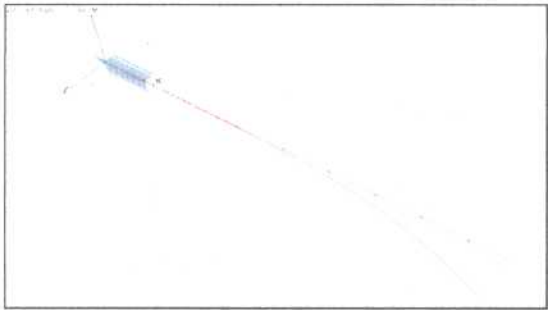


Figura 4.7. Primer modo de vibración del álabe $f_1 = 63,8$ Hz.

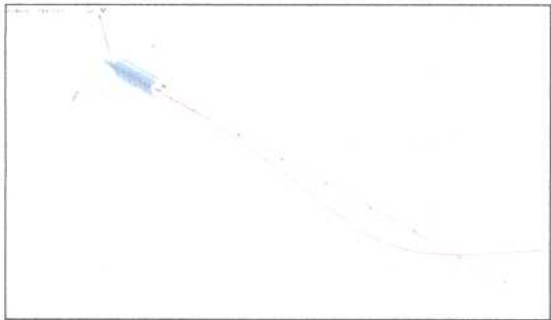


Figura 4.8. Segundo modo de vibración del álabe $f_2 = 209,2$ Hz.

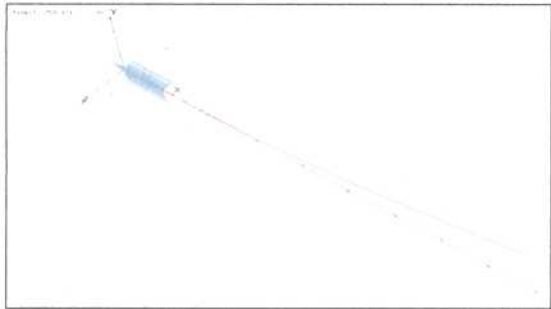


Figura 4.9. Tercer modo de vibración del álabe $f_3 = 369,7$ Hz.

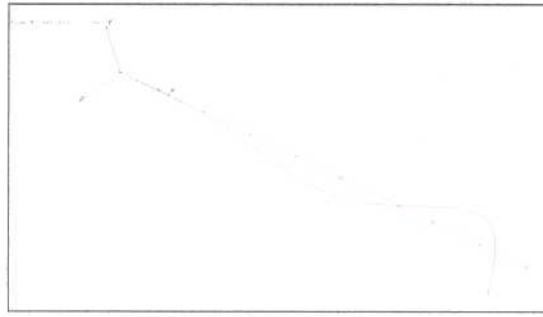


Figura 4.10. Cuarto modo de vibración del álabe $f_4 = 481,2$ Hz.

4.2.2. Modelo tridimensional del álabe

4.2.2.1. Construcción del modelo en 3D con elementos TETRA4R

La construcción geométrica del modelo 3D del álabe en el COSMOS/M se realizó a partir de los resultados mostrados de la Figura 4.5. En cada corte se realizó una interpolación con polinomios de tercer orden tomando como referencia los puntos coordenados que se obtuvieron de cada corte. El uso de estos polinomios evita que se presenten singularidades en los extremos del contorno. Luego de ajustar todos los cortes con los polinomios se generaron volúmenes entre dos superficies para de esta manera obtener todo el volumen del modelo.

Para el mallado de la geometría en 3D se emplearon elementos tipo TETRA4R a lo largo de todo el volumen del álabe y las propiedades del material son las correspondientes al acero inoxidable martensítico AISI 420 al igual que en el modelo de viga.

El modelo de álabe mallado con elementos tipo TETRA4R se muestra en la Figura 4.11. Las condiciones de contorno asumidas son las mismas que para el modelo de viga, es decir empotrado en la raíz [70]. El modelo consta de 3465 nodos y 13120 elementos distribuidos a lo largo de la viga.

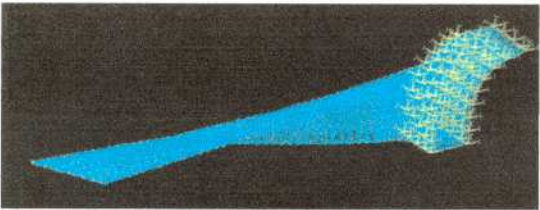


Figura 4.11. Modelo en 3D de álabe de turbina de vapor de CNA-I.

4.2.2.2. Resultados

La Tabla 4.4 muestra los resultados obtenidos de los cuatro primeros modos de vibración del álabe en 3D.

Tabla 4.4. Frecuencias naturales de vibración del álabe en 3D de turbina de vapor.

Modos (n)	Frecuencia [Hz]
1	74,8
2	191,4
3	347,9
4	452,4

La Figura 4.12 muestra el primer modo de vibración correspondiente a un modo de flexión, al igual que el segundo modo natural que se muestra en la Figura 4.13. Los modos tercero y cuarto corresponden a modos torsionales del álabe, que se presentan en las Figuras 4.14 y 4.15 respectivamente.

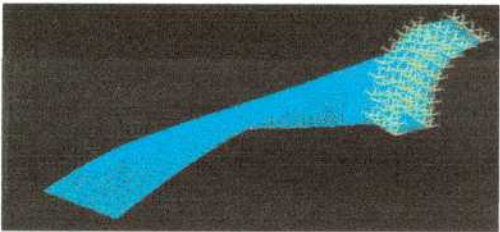


Figura 4.12. Primera forma modal de álabe estudiado $f_1 = 74,8$ Hz.

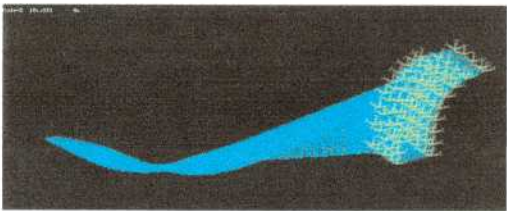


Figura 4.13. Segunda forma modal de álabe estudiado $f_2 = 191,3$ Hz.



Figura 4.14. Tercera forma modal de álabe estudiado $f_3= 347,9$ Hz.

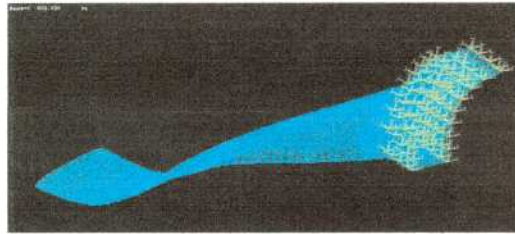


Figura 4.15. Cuarta forma modal de álabe estudiado $f_4= 452,4$ Hz.

En las Figuras 4.16 y 4.17 se presentan en detalle las formas modales de torsión correspondientes a los modos tercero y cuarto.

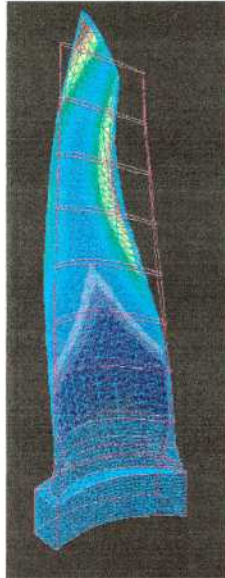


Figura 4.16. Detalle de la forma modal del tercer modo del álabe estudiado.



Figura 4.17. Detalle de la forma modal del cuarto modo del álabe estudiado.

4.3. Medición de frecuencias naturales

El análisis teórico provee valiosa información relacionada con las características dinámicas del componente. Además, la práctica de técnicas experimentales de mediciones de vibraciones es una herramienta importante en la validación de los modelos teóricos.

En esta sección se describen los ensayos de caracterización dinámica de diferentes álabes de la turbina de vapor de la CNA-I, sujetos a un dispositivo que lo ancla en la raíz. Se determinan en forma experimental las frecuencias naturales de vibración, los modos asociados y su correspondiente factor de amortiguamiento, ξ . Se utilizó el método de ensayos de impacto; la respuesta en frecuencia fue medida con las técnicas de sensores de contacto y vibrómetro láser.

Mediante el ensayo de impacto se estudiaron cuatro álabes: uno con fisuras retirado de servicio, previamente denominado como 53; y tres nuevos, con las denominaciones previas 1705, 1708 y 1773.

Para la determinación de las frecuencias naturales de vibración de estos álabes se empleó el dispositivo de sujeción que se muestra en la Figura 4.18. El dispositivo intenta reproducir las condiciones de empotramiento de la raíz del álabe al eje de la turbina de vapor, es decir restringir sus seis grados de libertad.

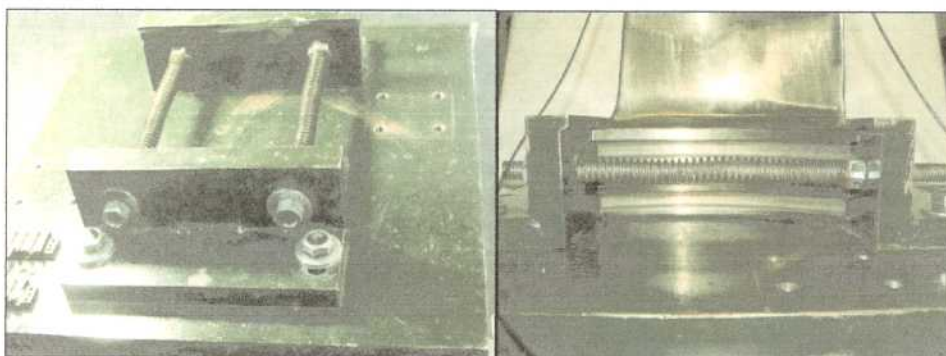


Figura 4.18. Izquierda: dispositivo de sujeción. Derecha: montaje del álabe sobre el dispositivo.

El dispositivo de ensayo se colocó sobre una mesa óptica antivibratoria para garantizar estabilidad de los equipos situados sobre ella y aislarlo de golpes y vibraciones externas.

4.3.1. Medición con sensores de contacto

En base a los resultados obtenidos con el MEF 3D, se realizaron mediciones sobre los distintos álabes para validar el modelo matemático y encontrar diferencias entre el álabe con fisuras y los nuevos.

4.3.1.1. Equipos utilizados

- Una PC equipada con un sistema de adquisición de datos modelo PULSE de la firma Brüel & Kjær (B&K), que opera como un analizador dinámico de señales de cinco canales.
- Dos acelerómetros miniatura marca B&K modelo 4374.
Tamaño ≤ 5 gramos; Rango de operación: ≥ 10 Hz.
- Dos amplificadores de carga marca B&K modelo 2635.
- Un calibrador portátil de acelerómetros, modelo 4294 de la firma B&K.
- Torquímetro marca UTICA, Patente No. 3.525.256, Orangeburg S.C.



Figura 4.19. Sistema de adquisición de datos.

4.3.1.2. Descripción del ensayo

El estudio del comportamiento de las distintas formas modales del álabe (flexión o torsión) que se obtuvieron con el MEF 3D brindó información acerca de cuántos acelerómetros son necesarios para reconocer experimentalmente cada forma modal y dónde deben ser ubicados. Se emplearon sensores miniatura (masa despreciable) con la finalidad de que éstos no afecten las respuestas del álabe, Figura 4.20.

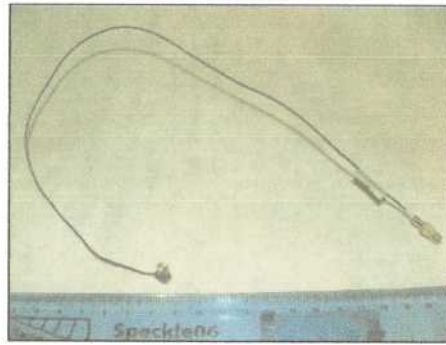


Figura 4.20. Acelerómetro miniatura empleado en el ensayo de impacto.

En la Figura 4.21 se observa el álabe montado sobre el dispositivo de sujeción. Se pueden ver también unas líneas que se trazaron sobre la superficie de presión del álabe, para usarlas como referencia para realizar las mediciones con dos acelerómetros (denominados S1 y S2), los cuales se ubicaron en zonas muy cercanas a los bordes de ataque (A) y fuga (F). En la primera configuración se ubicaron los acelerómetros en las posiciones A_0-F_0 como se muestra en la Figura 4.22, que corresponde a ambos sensores ubicados en los extremos de la punta del álabe. En la segunda configuración se los ubicó en las posiciones F_0-F_9 como se muestra Figura 4.23, que corresponde a ambos sensores ubicados en el borde de fuga, uno en la punta y el otro en la novena línea.



Figura 4.21. Líneas de referencias sobre la superficie de presión del álabe para la ubicación de sensores.

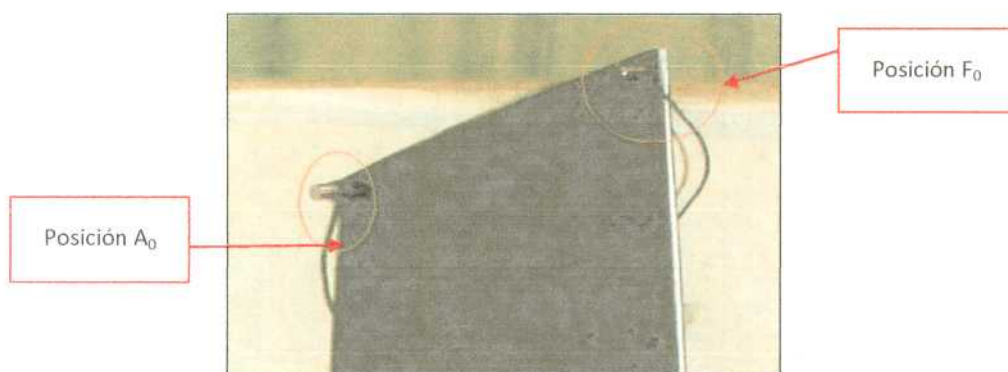


Figura 4.22. Primera configuración para ensayo de excitación por impacto en posiciones A_0 - F_0

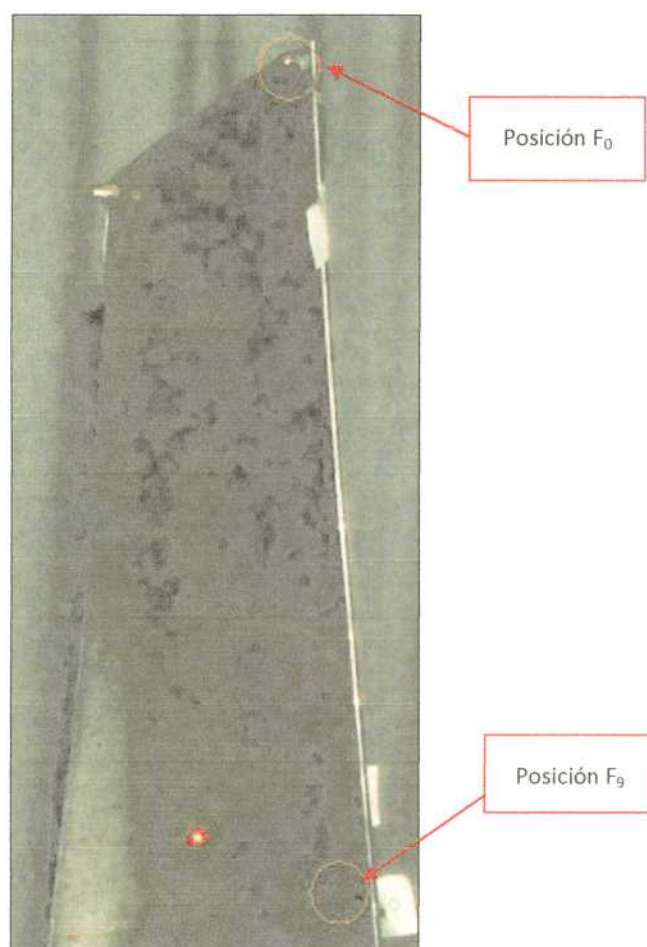


Figura 4.23. Segunda configuración para el ensayo de excitación por impacto en las posiciones F_0 - F_9 .

Respecto a la condición de sujeción del álabes al dispositivo de montaje, en todos los ensayos se aplicó un torque de (18 ± 1) lb·ft en los tornillos de apriete del

dispositivo. El método de excitación utilizado fue el de impacto. El golpe o impacto en cada una de las configuraciones fue dado varias veces, para asegurar una mejor identificación de los picos

Para la adquisición digital de datos, la configuración empleada en el software se detalla a continuación:

- Ventana rectangular o uniforme: se utiliza este tipo de ventana en los ensayos de impacto para determinar frecuencias naturales, ya que se requiere una buena exactitud en frecuencias y no tanto en amplitud.
- Frecuencia máxima de análisis: 400 Hz
- Número de líneas espectrales: 3200. El número de líneas espectrales es el resultado de analizar con la transformada de Fourier N puntos de una forma vibratoria en función del tiempo.
- Resolución en frecuencia: 0,125 Hz.

Una vez configurado todo el sistema de medición y previo a las mediciones, se realizó el procedimiento de calibración de los sensores. Para esto se midió la respuesta de los acelerómetros frente a una excitación conocida.

4.3.1.3. Resultados del análisis en frecuencia

Las condiciones que se deben verificar en los espectros de respuesta para asegurar que los picos observados corresponden a las frecuencias de resonancia son:

- un pico bien definido en el gráfico aceleración vs. frecuencia, en el autoespectro de cada sensor.
- diferencia de fase 0° ó 180° que corresponda al pico mencionado anteriormente, en el espectro cruzado entre sensores.

Las Figuras 4.24 hasta 4.27 muestran los espectros obtenidos para cada álabe para una configuración de sensores dada. Los resultados detallados se muestran en el Anexo B, el cual incluye los espectros para las dos configuraciones de los acelerómetros y la diferencia de fase entre ellos [71]. En los espectros que se obtuvieron se aprecia un pequeño pico a una frecuencia cercana a los 212 Hz.

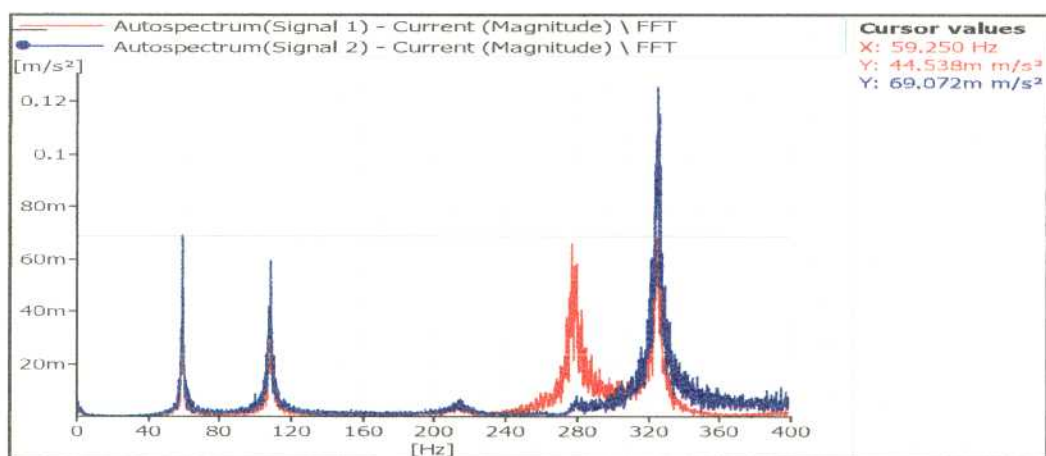


Figura 4.24. Espectro de frecuencias del álabe 53 (fisurado). Medición con acelerómetros de contacto. Configuración A_0 - F_0 .

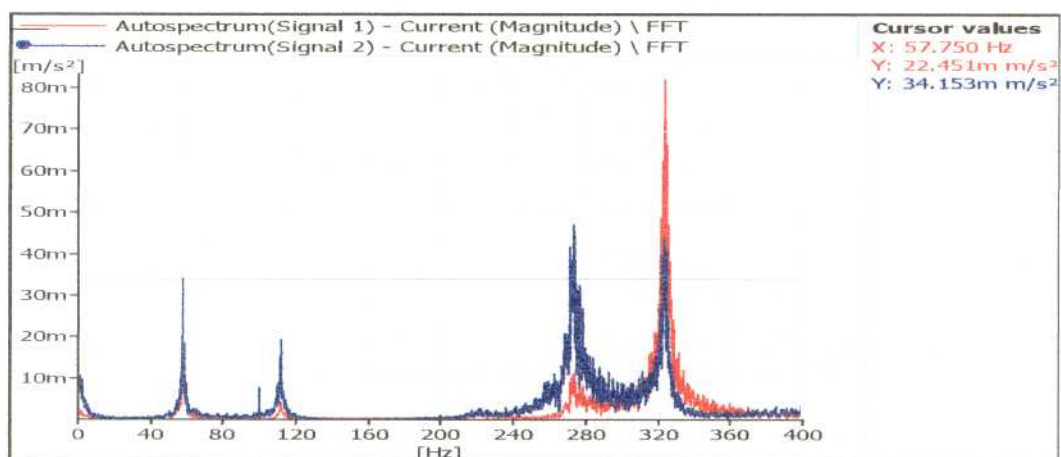


Figura 4.25. Espectro de frecuencias del álabe 1705. Medición con acelerómetro de contacto. Configuración A_0 - F_0 .

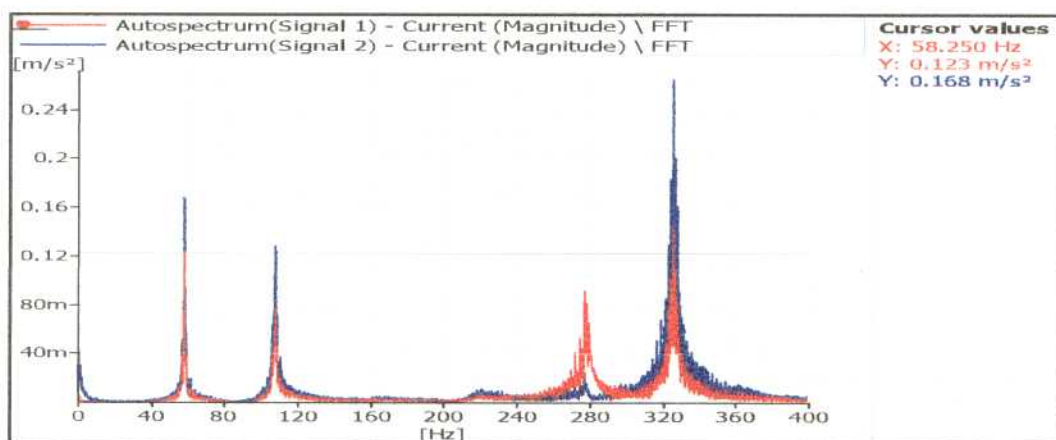


Figura 4.26. Espectro de frecuencias del álab 1708. Medición con acelerómetro de contacto.
Configuración A_0-F_0 .

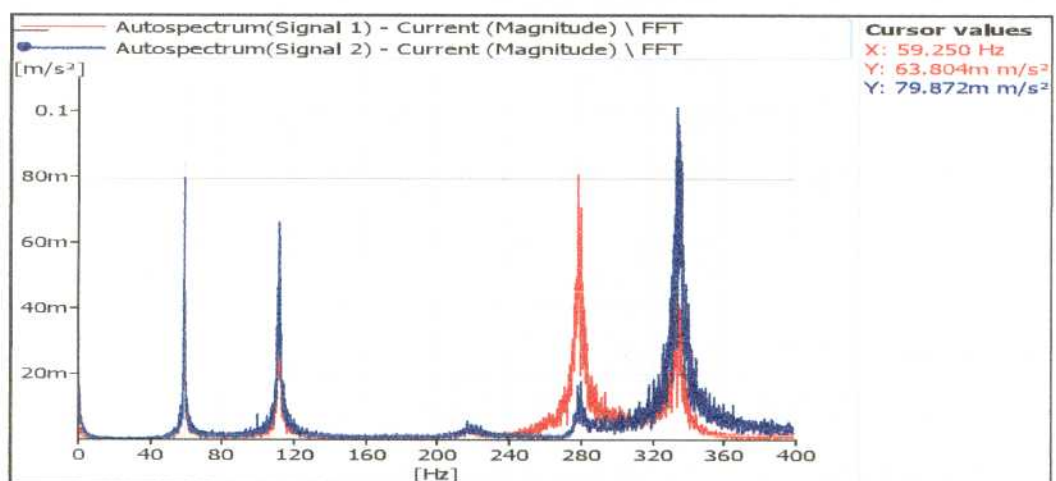


Figura 4.27. Espectro de frecuencias del álab 1773. Medición con acelerómetros de contacto.
Configuración A_0-F_0 .

La Tabla 4.5 muestra un resumen de todas las mediciones realizadas, con el correspondiente análisis estadístico y el tipo de respuesta observado (flexión o torsión). El modo de respuesta se determina según la diferencia de fase entre los sensores y la ubicación de éstos sobre el álab. La configuración más sencilla para determinar el modo de respuesta que se obtiene es la A_0-F_0 , en la que los dos sensores están en la punta del álab sobre la superficie de presión, uno en el borde de ataque y el otro en el de fuga; una diferencia de fase de 0° corresponde a flexión, mientras que, una diferencia de 180° corresponde a torsión.

Tabla 4.5. Frecuencias de resonancia para los distintos álabes y sus respectivos errores.

Medición con acelerómetros de contacto.

Modo observado	Frecuencias [Hz]			
	Álabe 53	Álabe 1705	Álabe 1708	Álabe 1773
Flexión	59±1	58±1	58±1	59±1
Flexión	107±2	111±1	108±1	112±1
Flexión	212±2	220±2	221±2	...
Torsión	277±2	273±1	278±1	279±1
Torsión	326±2	322±1	327±1	335±1

4.3.1.4. Resultados en el dominio del tiempo–Factor de amortiguamiento

Los coeficientes de amortiguamiento de los álabes de turbina se calcularon a partir de la respuesta del álabe en función del tiempo ante un ensayo de impacto, donde el coeficiente de amortiguamiento se calculó mediante la ecuación (3-19):

$$\xi = \frac{1}{2\pi n} \ln \left(\frac{A_n}{A_0} \right)$$

donde n es el número de ciclos; A_0 y A_n corresponden a las amplitudes de los ciclos de la respuesta del componente, tomados como inicial y final en dicho cálculo.

Las respuestas se presentan en las figuras 4.28 a 4.31 y los resultados se resumen en la Tabla 4.6.

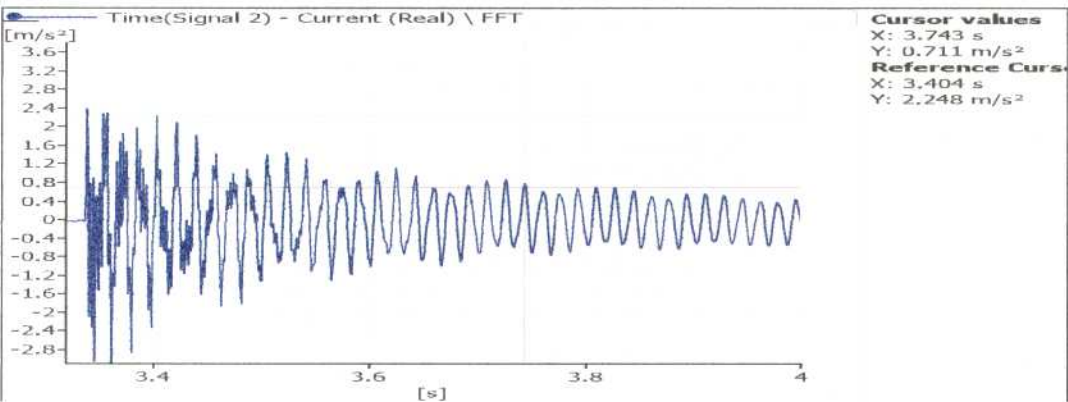


Figura 4.28. Respuesta al impacto en el dominio del tiempo del álabe 53 (con fisuras).

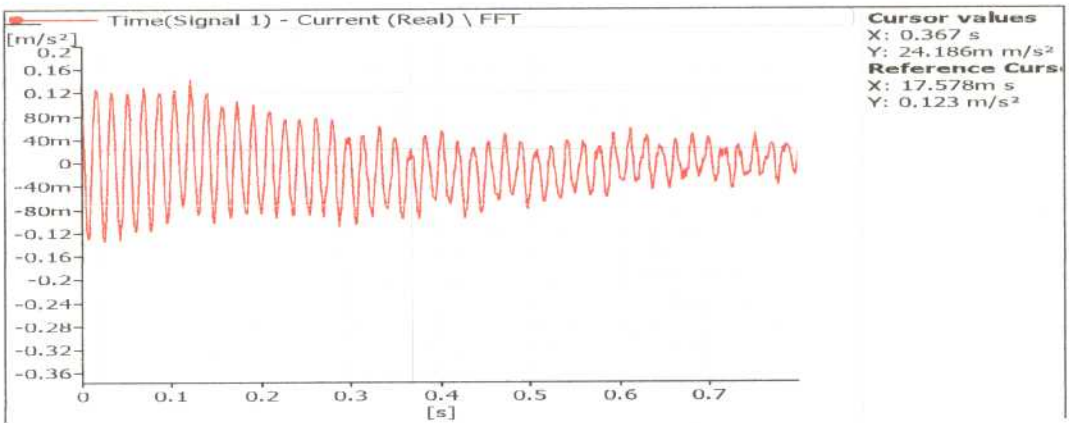


Figura 4.29. Respuesta al impacto en el dominio del tiempo del álab 1705.

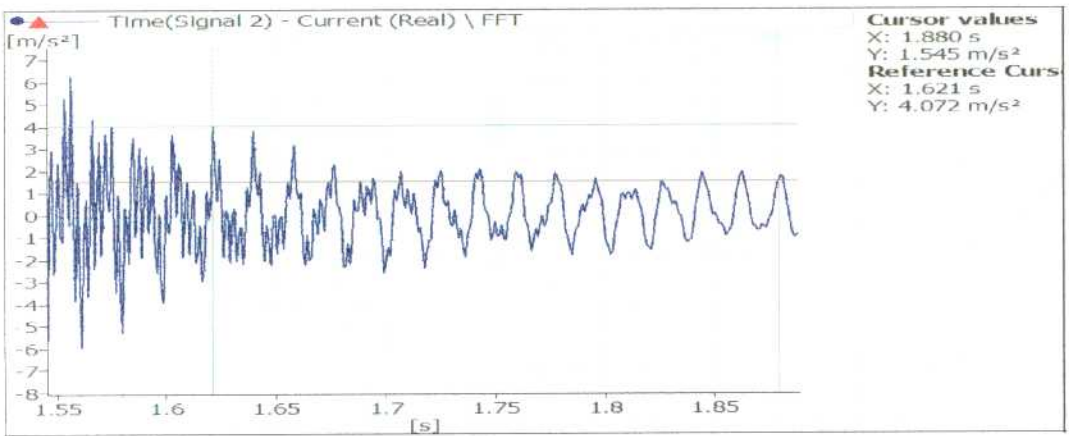


Figura 4.30. Respuesta al impacto en el dominio del tiempo del álab 1708.

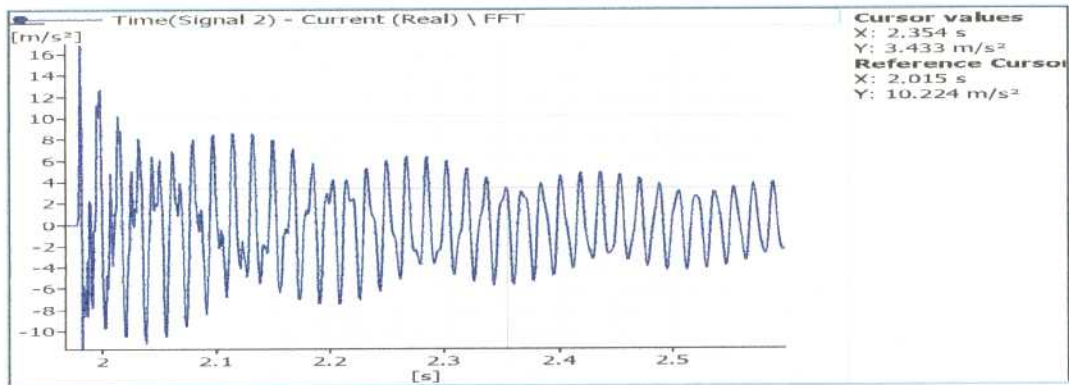


Figura 4.31. Respuesta al impacto en el dominio del tiempo en álab 1773.

Tabla 4.6. Frecuencias naturales de los distintos álabes y el correspondiente factor de amortiguamiento calculado

Álabe	Frecuencia natural [Hz]	ξ
53 (con fisuras)	59 ± 1	0,009
1705	57 ± 1	0,0129
1708	58 ± 1	0,010
1773	59 ± 1	0,0086

4.3.2. Medición con vibrómetro láser

El vibrómetro láser cuantifica las oscilaciones mecánicas de un objeto sin entrar en contacto físico con él. Se plantea la técnica de medición sin contacto para realizar una comparación frente a los resultados obtenidos con los acelerómetros.

4.3.2.1. Equipos utilizados

- Osciloscopio marca Tektronik TDS 210 Digital Real–Time. S N B0 48636.
Escala empleada: 50 Hz/div.
Rango de medición: 0-500 Hz.
Resolución en frecuencia: 0,49 Hz.
- Un calibrador portátil de acelerómetros, modelo 4294 de la firma B&K.
- Un vibrómetro láser marca B&K modelo VH–1000-D.

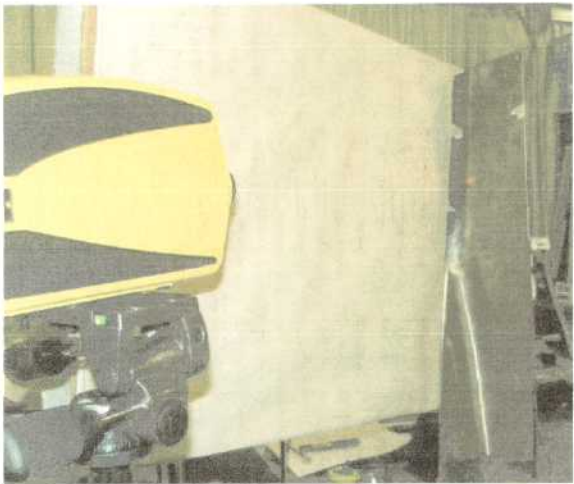


Figura 4.32. Configuración de medición con vibrómetro láser.

4.3.2.2. Descripción del ensayo

Las condiciones de ensayo son semejantes a las empleadas con los transductores piezoeléctricos, es decir, excitando varias zonas del álabe y restringiendo las traslaciones y rotaciones en la raíz. Las mediciones se realizaron alineando el haz de manera que incida sobre la superficie perpendicularmente, aunque la geometría del álabe dificulte un poco esta operación. Se midió a una distancia de 652 mm, recomendada por el fabricante para una relación óptima entre señal-ruido [54, 71].

Cuando incide el haz láser sobre la superficie de un objeto en movimiento, se produce una variación en la frecuencia de la radiación reflejada debido al efecto Doppler. Con un interferómetro se evalúa dicha variación y se convierte en una señal que se acondiciona para su registro en un osciloscopio o computadora.

Previo a todas las mediciones se realizó el procedimiento de calibración del vibrómetro. Para esto se midió la respuesta del equipo frente a una excitación conocida.

4.3.2.3. Resultados

Las Figuras 4.33, 4.34, 4.35 y 4.36, muestran los espectros en el dominio de la frecuencia obtenidos con el vibrómetro láser. A partir del análisis de los espectros se identificaron picos con valores muy similares a los mostrados en la Tabla 4.5, sin embargo, con un solo vibrómetro láser no es suficiente para identificar la forma modal a la que corresponde (flexión o torsión).

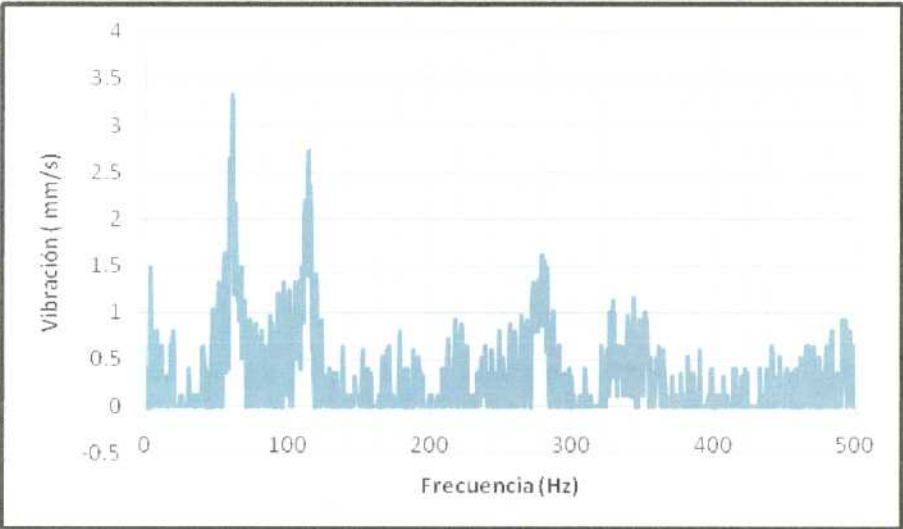


Figura 4.33. Espectro de frecuencias del álabe 53. Medición con vibrómetro láser conectado a un osciloscopio. Rango de medición: 0-500 Hz.

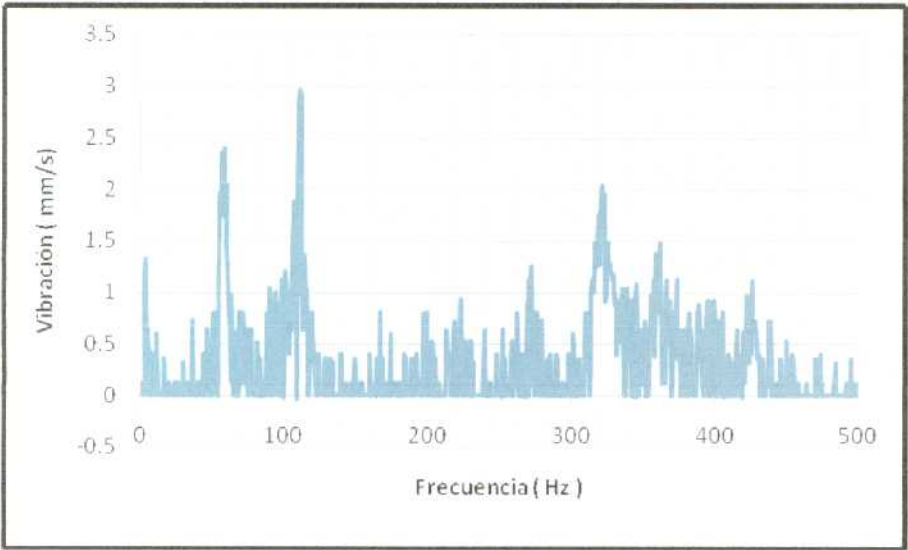


Figura 4.34. Espectro de frecuencias del álabe 1705. Medición con vibrómetro láser conectado a un osciloscopio. Rango de medición: 0-500 Hz.

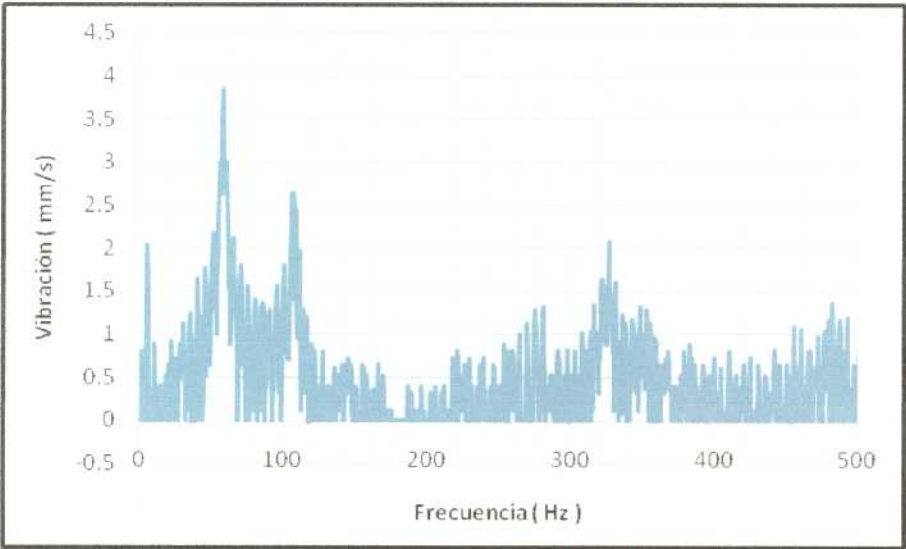


Figura 4.35. Espectro de frecuencias del álabe 1708. Medición con vibrómetro láser conectado a un osciloscopio. Rango de medición: 0-500 Hz.

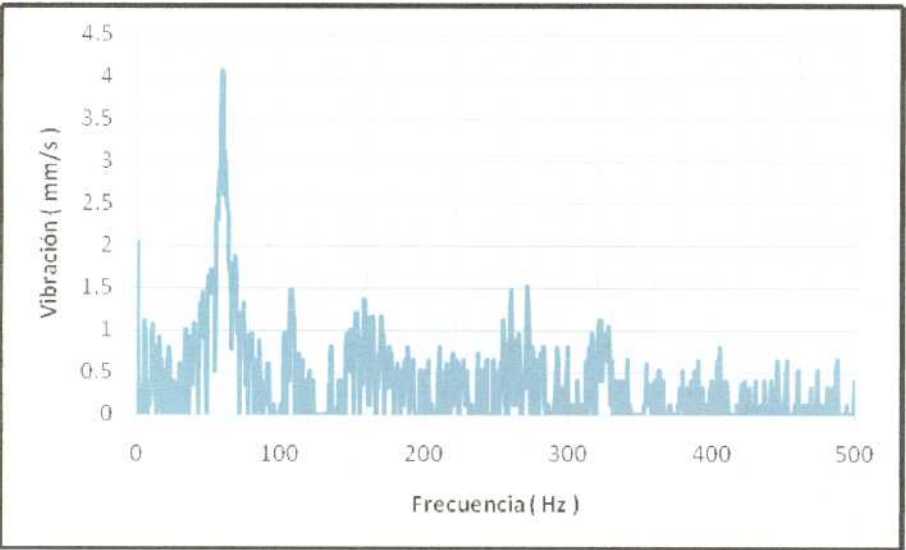


Figura 4.36. Espectro de frecuencias del álabe 1773. Medición con vibrómetro láser conectado a un osciloscopio. Rango de medición: 0-500 Hz.

La Tabla 4.7 muestra los valores de frecuencia registrados para cada álabe con su respectivo error proveniente del análisis estadístico.

Tabla 4.7. Frecuencias de resonancia para los distintos álabes con su respectivo error.

Medición con vibrómetro láser.

Modo observado	Frecuencias [Hz]			
	Álabe 53	Álabe 1705	Álabe 1708	Álabe 1773
1	60±1	56±1	58±1	60±1
2	114±1	109±1	107±1	107±2
3	215±3	224±2	220±2	...
4	279±2	271±1	276±2	270±1
5	327±1	321±1	326±1	327±2

4.4. Otras técnicas

En esta sección se presentan otras técnicas propuestas para el estudio de los álabes, que no prosperaron, ya sea por falta de tiempo o porque los resultados no fueron los esperados.

Como se vio en el Capítulo 1, el material con el que se fabrican los álabes aquí estudiados es el acero inoxidable martensítico AISI 420. Este material posee una estructura martensítica (tetragonal centrada en el cuerpo–bct), que es ferromagnética. Aprovechando esta característica, el ensayo consistió en generar un esfuerzo mecánico (torsión o flexión) sobre el álabe, mediante la aplicación de campos magnéticos.

Se propusieron dos sistemas de medición que no se ven afectados por la presencia de campos magnético:

- Un sistema de láser y fotodiodo para medir las frecuencias naturales del álabe.
- extensómetros de fibra óptica con celda de Bragg.

4.4.1. Sistema de excitación magnética

4.4.1.1. Equipos utilizados

- Diodo Láser: Potencia 5 mW; longitud de onda 670 nm.
- Osciloscopio Hewlett Packard 54603B.
- Fotodiodo: longitud de calibración 250 mm; rango de operación +/- 5V.
- Equipo excitador: Mesa soporte – dispositivo de sujeción

Bobinas de excitación

Servo amplificador de fuente dividida

Frecuencímetro Philips PM 6620

La Figura 4.37 muestra esquemáticamente el dispositivo empleado. En la entrada se cuenta con un generador de funciones que entrega una señal sinusoidal cuya frecuencia puede ser variada. Dicha señal pasa por un servo amplificador de fuente dividida de gran potencia para incrementar la corriente. A la salida del amplificador, dos diodos rectificadores separan la señal amplificada permitiendo el paso de la corriente según la polarización de cada diodo; uno de los diodos se polariza con el hem ciclo positivo y el otro, con el negativo. De esta manera se pueden aplicar campos magnéticos que atraigan al material ferromagnético en un sentido o en otro, produciendo esfuerzos de flexión o torsión según las conexiones de las bobinas.

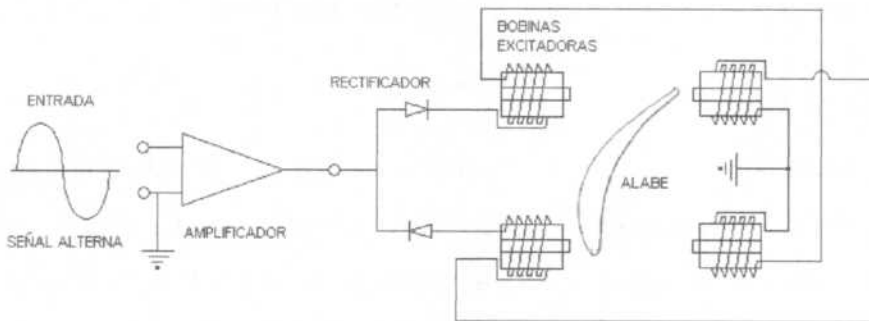


Figura 4.37. Esquema del amplificador y bobinas.

4.4.1.2. Descripción del ensayo

Se monta el álab e sobre la mesa soporte y se lo ajusta en la zona de la raíz con un torque aproximado de 18 lb·ft en los dos tornillos del dispositivo de sujeción. Una vez que se ajusta la condición de excitación (flexión ó torsión) se pasa a la etapa de medición: se hace incidir el haz de un diodo láser sobre un espejo adherido a la superficie del álab e en una zona cercana a la excitación. El haz reflejado pasa a través de dos lentes convergentes y luego es captado por un fotodiodo conectado a un osciloscopio donde se observa la señal de respuesta. Se aplica una excitación con el generador de funciones y se varía la frecuencia de la onda. Al mismo tiempo se observa la señal de respuesta del fotodiodo en el osciloscopio hasta que la misma

encuentra un máximo. La frecuencia para la cual ocurre este máximo es la que corresponde al modo solicitado. Un esquema de los equipos utilizados en el laboratorio se muestra en la Figura 4.38.

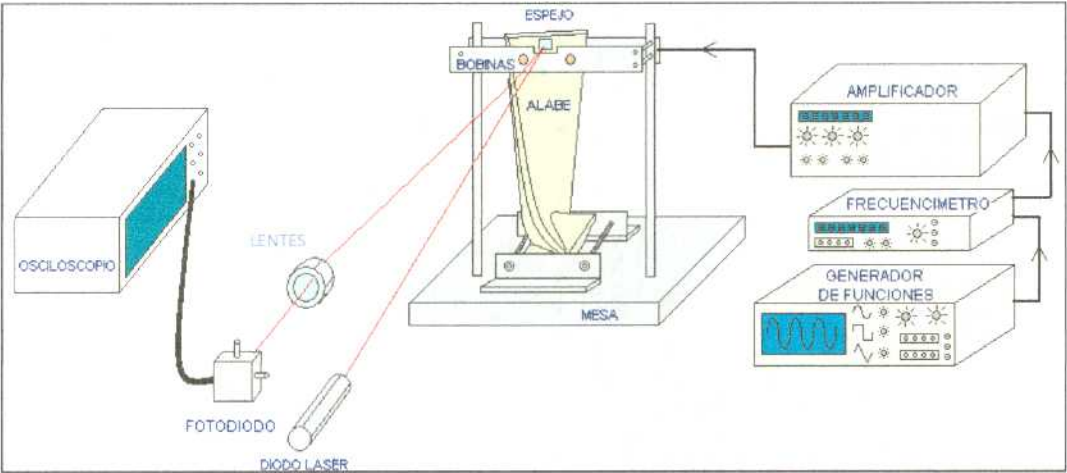


Figura 4.38. Esquema del sistema de excitación magnética y medición láser y fotodiodo.

4.4.1.3. Resultados

La Tabla 4.8 muestra los resultados obtenidos. Se observa que no se hace distinción del tipo de carga aplicada para excitar diferentes modos (torsión o flexión) ya que, contrariamente a lo esperado, en todos los casos se obtuvieron valores muy similares. Este sistema de excitación fue diseñado suponiendo que la respuesta del álabes sería diferente en función de la carga aplicada. Sin embargo los resultados obtenidos no fueron los esperados.

Tabla 4.8. Resultados obtenidos con excitación magnética y medición láser.

Álabe	Frecuencias de Resonancia [Hz]							
(Código)	Primera	Segunda	Tercera	Cuarta	Quinta	Sexta	Séptima	Octava
53	35	41	83	112	142	183	291	364
1705	35	42	85	112	143	176	283	343
1708	36	42	86	113	141	178	291	341
1773	35	43	85	112	140	178	286	365

Haciendo una comparación de estos resultados con los anteriores obtenidos en el MEF-3D y los otros métodos experimentales, se observa que aparecen más valores de frecuencias de resonancia, lo que generó dudas respecto de los resultados

obtenidos. Un chequeo posterior con acelerómetros de contacto sobre toda la estructura reveló que algunos valores registrados en la Tabla 4.8 corresponden a frecuencias espurias pertenecientes a la estructura, en particular a los soportes sobre los cuales se colocan las bobinas.

4.4.2. Sistema de medición de deformaciones con sensores de fibra óptica

La implementación del sistema de medición de deformaciones con sensores de fibra óptica en el álabe no se concretó por razones que se explican en el siguiente capítulo, sección 5.7. No obstante, se muestran a continuación los detalles de los experimentos realizados sobre un fleje para comparar el desempeño entre los sensores de deformación ópticos y un sensor convencional.

4.4.2.1. Equipos utilizados

- Equipo interrogador óptico. Fabricante: Micron Optics. Modelo: SM-130. Este equipo genera el espectro de luz que viaja a través de la fibra óptica y al mismo tiempo analiza la longitud de onda del espectro que regresa, Figura 4.39 izquierda.
- Equipo indicador de deformaciones portátil con puente de Wheatstone. Fabricante: Vishay Instrumentes. Modelo: P- 3500. Figura 4.39 derecha.
- Tres sensores ópticos de deformación os3120.

Fabricante: Micron Optics.

Longitud de onda nominal, λ_0 @22°C: 1572 nm

Longitud de onda nominal, λ_0 @22°C: 1552 nm

Longitud de onda nominal, λ_0 @22°C: 1536 nm

Deformación máxima: $\pm 2500 \mu\epsilon$

Gage factor @22°C: $f = 1$

- Sensor óptico de deformación os1100

Fabricante: Micron Optics

Longitud de onda nominal, λ_0 @22°C: 1516 nm

Deformación máxima: $\pm 5000 \mu\epsilon$

Gage factor @22°C: $f = 1$

- Sensor de deformación convencional para propósitos generales

Fabricante: Micro-Measurements

Modelo:EA-03-050AR-120.

Rango de deformación: $\pm 3\%$



Figura 4.39. Equipos de medición de deformaciones. Izquierda: sistema de fibra óptica.

Derecha: sistema convencional.

4.4.2.2. Descripción del ensayo

Con el objetivo de comparar las mediciones obtenidas de los sensores de deformación ópticos (os3120 y os1100) con las de un strain gage convencional, se realizó un ensayo en el laboratorio. Un fleje de aluminio se coloca en voladizo y se le aplican cargas de flexión. Se mide la deformación en tracción del fleje para todos los casos, con los sensores colocados en su centro. Los sensores fueron adheridos a éste con una resina epoxy y un agente de curado y se lo dejó secar durante 24 horas. La carga se aplica en un extremo del fleje. La Figura 4.40 y la Tabla 4.9 muestran los datos del fleje instrumentado. La temperatura del laboratorio durante las mediciones fue de 23°C.

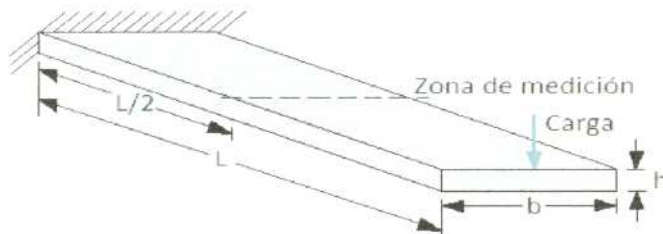


Figura 4.40. Esquema del fleje instrumentado.

Tabla 4.9. Datos del fleje de aluminio instrumentado.

Aleación	Aluminio aeronáutico 6061
b	52 mm
h	3 mm
L	240 mm
E	69500 MPa

En la Figura 4.41 se observa el fleje instrumentado con los tres sensores. En la parte central superior se puede ver el sensor os3120, que tiene una estructura metálica. En la parte central inferior se aprecia el sensor os1100, el cual está embebido en resina. Entre ambos sensores se encuentra ubicado el strain gage convencional.

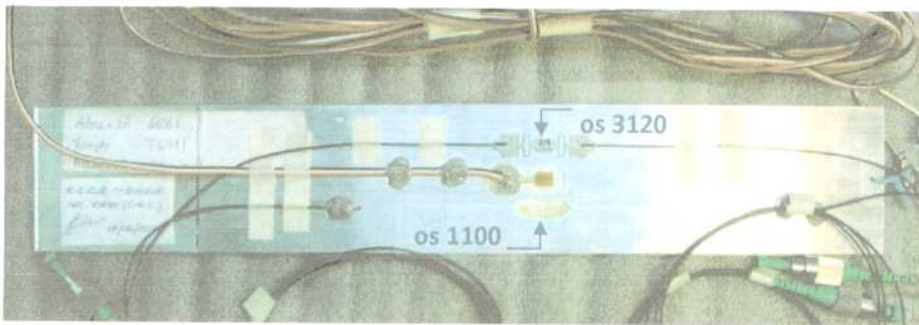


Figura 4.41. Fleje de aluminio instrumentado con sensores de deformación.

4.4.2.3. Resultados

Los resultados que se obtuvieron con este método de medición se observan en la Figura 4.42. Las diferencias que se aprecian en los sensores os3120 $\lambda=1572$ nm y $\lambda=1552$ nm respecto del resto se deben a un proceso malogrado de pegado. La constitución geométrica de la estructura metálica del sensor posee un canal por donde pasa la fibra; cuando el pegado se realiza en forma inadecuada, la resina entra en el canal provocando que la respuesta del sensor se modifique.

El factor de celda (gage factor, f) mostrado en los resultados es un parámetro que se aplica cuando un extensómetro óptico debe ser compensado por temperatura debido a la variación interna de la red. En caso de que la temperatura no afecte a la medición, $f = 1$. Sin embargo, este factor también debe aplicarse cuando se tiene un extensómetro con estructura metálica y la carga aplicada provoca flexión. Esto se debe a que la variación de la red interna de Bragg no sólo se debe a la fuerza de tracción que

experimenta, llegado el caso, sino también a la separación que existe entre el material ensayado y la fibra, la cual queda a una pequeña distancia de la superficie, debido a la geometría de la estructura metálica. El factor de celda $f = 1,27$ empleado en el sensor os3120 $\lambda=1536\text{ nm}$ se determinó geométricamente considerando la separación entre la fibra óptica y el material.

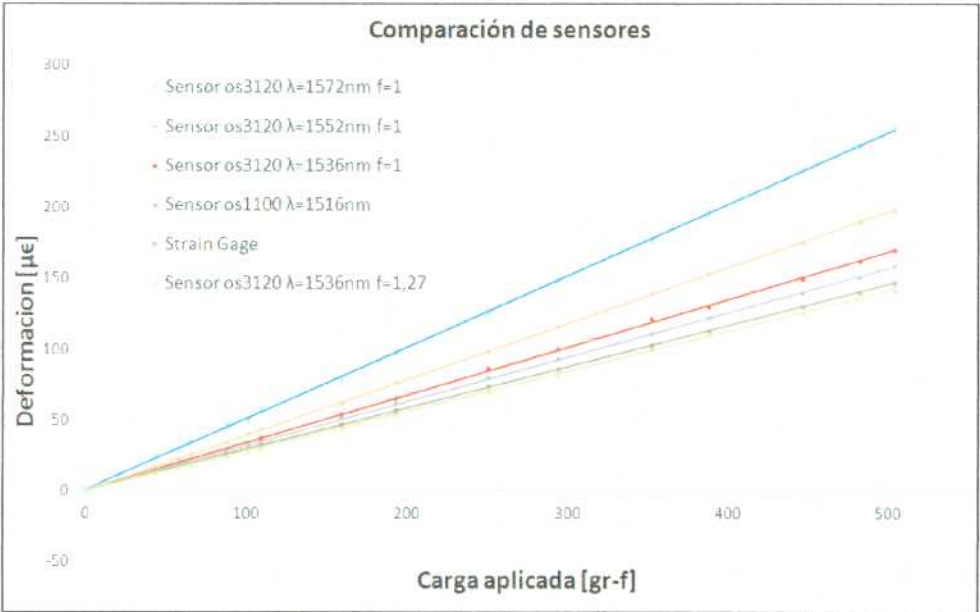


Figura 4.42. Comparación de los distintos sensores de deformación.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este Capítulo se analizan en primer lugar los resultados obtenidos con cada una de las distintas técnicas y métodos aplicados en los diferentes álabes, buscando si existen diferencias significativas entre el álabe fisurado y los tres álabes nuevos en base a su frecuencia natural de vibración. Luego se realiza un análisis comparativo entre las distintas técnicas y métodos, que nos permitió retroalimentar al modelo y evaluar el diseño experimental. Finalmente se analizan los resultados de las técnicas que no prosperaron y se discute las razones por las cuales no se concretó su desarrollo.

5.1. Modelo simplificado de álabe de turbina de vapor

La primera frecuencia natural del álabe modelado como una viga recta de sección variable dio como resultado 63,8 Hz. Su forma modal corresponde a la de una viga empotrada en un extremo y libre en el otro, con movimiento de flexión, la oscilación se presenta en la dirección Z, y tiene su máxima amplitud en el extremo del álabe, Figura 5.1 izquierda.

En el segundo modo la frecuencia tiene un valor de 209,2 Hz. En la teoría de ondas se conoce como nodo a un elemento que no vibra y vientre, a un elemento que vibra con máxima amplitud. El segundo modo representado en el centro de la Figura 5.1 presenta la formación de un vientre y un nodo. La oscilación de esta forma modal es de flexión y ocurre en la dirección Z.

El tercer modo es también de flexión, con una frecuencia 369,5 Hz. Tiene un comportamiento similar al primer modo pero la oscilación ocurre en la dirección Y, como se aprecia en la Figura 5.1 a la derecha.

La primera frecuencia y tercera frecuencias naturales, corresponden al primer modo de vibración de una viga empotrada en un extremo y libre en el otro, pero se diferencian en el momento de inercia que la sección tiene en cada plano.

En los modos superiores el comportamiento observado es similar al segundo modo, pero a medida que aumenta el orden, aumenta también el número de nodos y vientos.

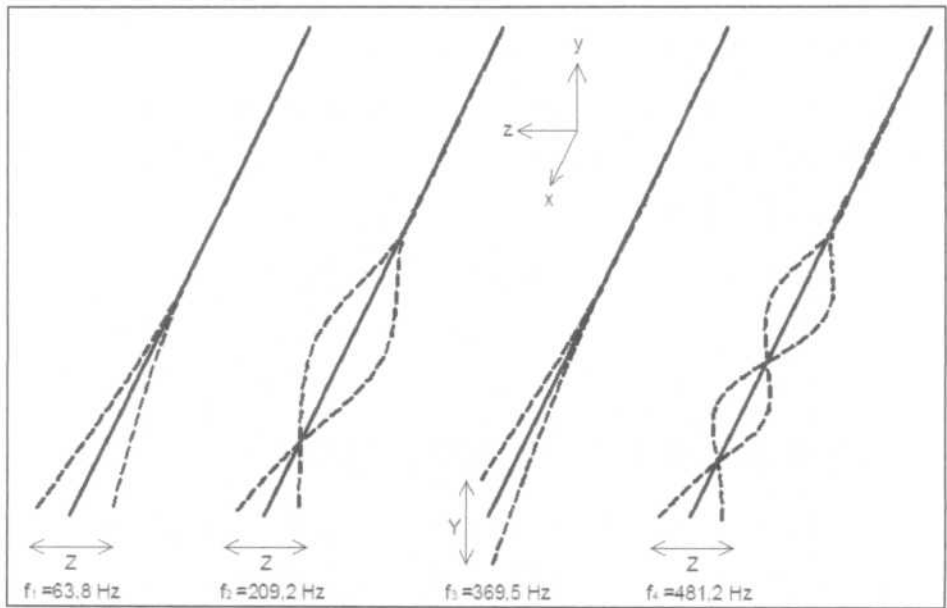


Figura 5.1. Formas modales del álabe correspondientes a los cuatro primeros modos en el modelo de línea

Estos resultados permiten obtener una primera aproximación del valor de las frecuencias naturales con el objetivo de compararlas con modelos más elaborados y diseñar las mediciones experimentales.

5.2. Modelo en 3D de álabe de turbina de vapor de tercera etapa

El modelo en tres dimensiones ofrece una mejor representación geométrica y estructural del perfil del álabe.

La primera frecuencia natural del álabe modelado con elementos sólidos es de 74,8 Hz; la forma modal corresponde a un movimiento de flexión, teniendo una máxima amplitud en el extremo del álabe. La segunda frecuencia natural con un valor de 191,3 Hz, tiene un comportamiento de flexión y en su forma modal aparece un vientre y un nodo, similar al que se mostró en los resultados anteriores. La tercera frecuencia natural, con un valor de 347,9 Hz, corresponde a un modo torsional.

El análisis de las deformaciones provocadas cuando el álabe vibra sintonizado a sus frecuencias naturales muestra que las deformaciones máximas se encuentran en la punta y en los bordes de ataque y de fuga como se muestra en las Figuras 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 correspondientes a los cuatro primeros modos.

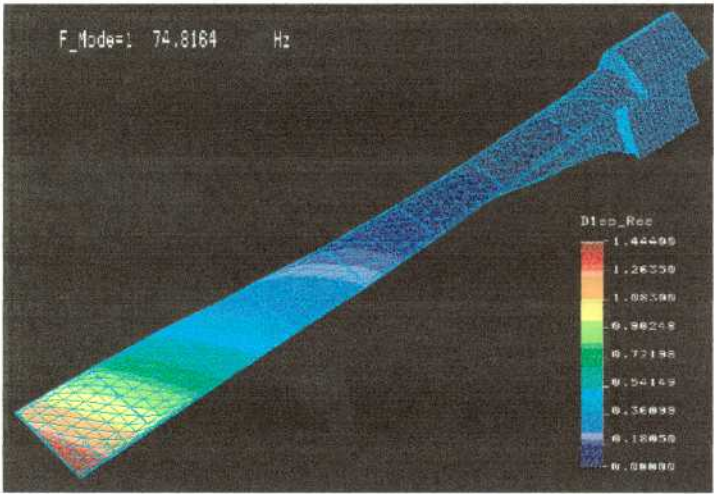


Figura 5.2. Diagrama de deformaciones del álabe cuando vibra sintonizado a su primera frecuencia natural.

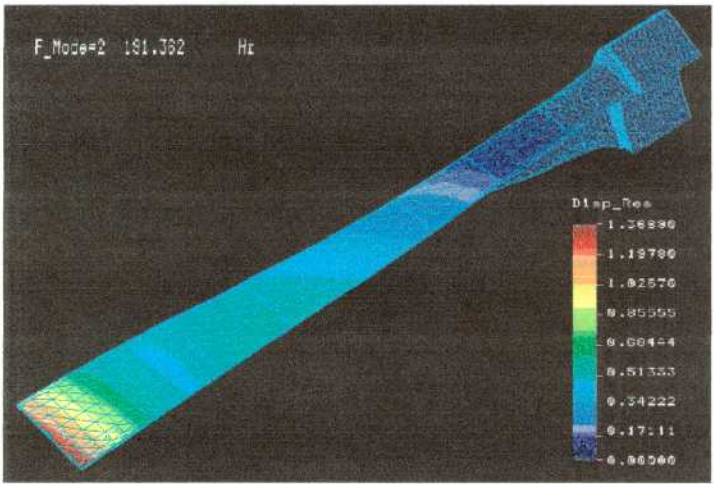


Figura 5.3. Diagrama de deformaciones del álabe cuando vibra sintonizado a su segunda frecuencia natural.

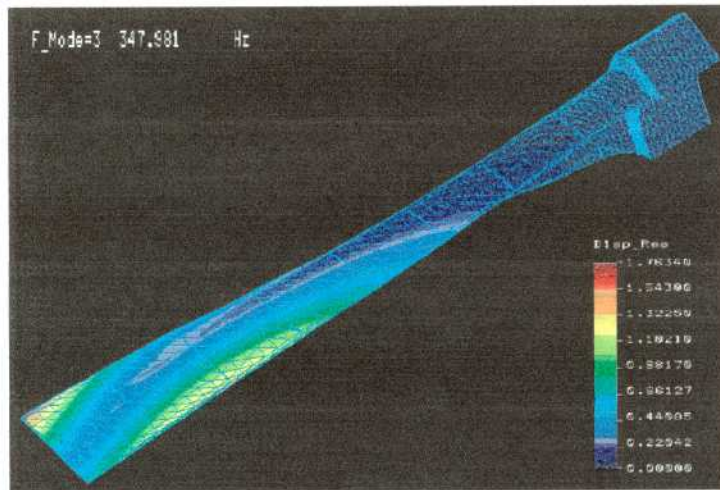


Figura 5.4. Diagrama de deformaciones del álabe cuando vibra sintonizado a su tercera frecuencia natural.

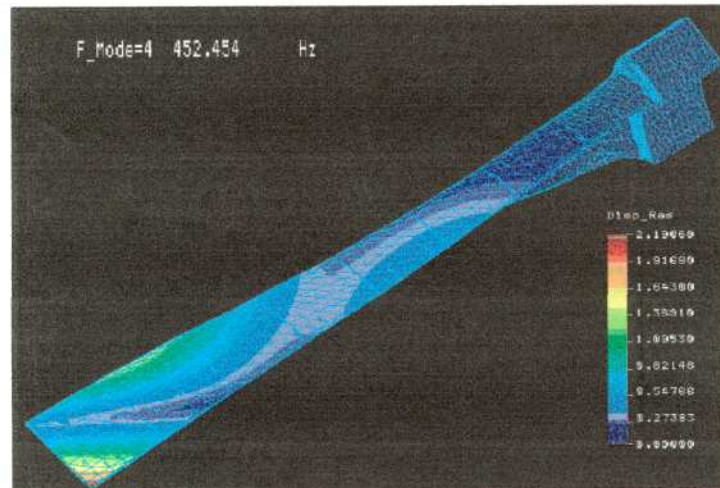


Figura 5.5. Diagrama de deformaciones del álabe cuando vibra sintonizado a su cuarta frecuencia natural.

El análisis de los resultados obtenidos con este método fue un paso importante previo al desarrollo experimental, ya que de acuerdo a las zonas de máxima deformación y a la ubicación de vientres y nodos fue posible determinar la ubicación de los sensores sobre el álabe y que con sólo dos sensores piezoeléctricos se pueden identificar experimentalmente los modos de vibración.

5.3. Medición de vibraciones con acelerómetros piezoeléctricos

Con las mediciones de los acelerómetros se identificaron los picos correspondientes a los cinco primeros modos de vibración y si correspondieron a flexión o torsión. De acuerdo a la diferencia de fase entre las señales de cada sensor, la ubicación de los acelerómetros sobre el álabe y la intensidad del pico, se determinó que los tres primeros picos correspondían a flexión y los dos últimos a torsión, como lo muestra la Tabla 4.5 del capítulo anterior. Los resultados mostrados en esa tabla advierten de la presencia de otros modos que no aparecieron en el modelo 3D con elementos finitos.

La comparación entre los valores de frecuencias naturales encontrados para el álabe retirado de servicio (53) y los álabes libres de fallas (1705, 1708 y 1773) a través de esta técnica no permite discriminarlos dado que los valores no presentan diferencias significativas dentro del error de medición.

Respecto al coeficiente de amortiguamiento, una vez registradas las oscilaciones en el dominio del tiempo, se calcularon los valores para los cuatro álabes, los que se registran en la Tabla 4.6 del capítulo anterior. Se observa que los valores obtenidos son menores a 1, con lo que se puede decir que los cuatro álabes sujetos en la raíz vibran en forma libre amortiguada, con un amortiguamiento aproximado del 1%. Ya que el sistema es poco amortiguado se pueden generar vibraciones tan altas como para llegar a fallas catastróficas al sintonizar una de sus frecuencias naturales. Este parámetro intrínseco del material no puede ser utilizado para realizar una evaluación del estado del componente.

5.4. Medición de vibraciones con vibrómetro láser

Con el uso de la técnica de vibrometría láser se verificaron los picos correspondientes a las frecuencias naturales obtenidos con los acelerómetros de contacto. Sin embargo, al contar con un solo vibrómetro no se puede inferir acerca del comportamiento de la respuesta observada (torsión o flexión). Esta técnica, al igual que la anterior, no permite discriminar entre álabe retirado de servicio y los álabes

libres de fallas dado que los valores no presentan diferencias significativas dentro del error de medición.

5.5. Análisis comparativo

La Tabla 5.1 muestra las mediciones del primer modo con ambas técnicas experimentales para los cuatro álabes. Las expectativas en los ensayos experimentales eran encontrar diferencias en las frecuencias naturales del álabe fisurado, considerando que las fisuras provocan una disminución de la sección efectiva del componente y por lo tanto una disminución en su rigidez, que se debería reflejar en valores de frecuencia de resonancia menores que las de los componentes libres de fisura. Sin embargo, las mediciones no respaldan la expectativa, ya que se observan valores semejantes en las mediciones para los cuatro álabes con ambas técnicas. Se puede decir que las características de las fisuras presentes no modifican la respuesta del componente con la sensibilidad empleada en estas mediciones.

Tabla 5.1. Mediciones del primer modo para los cuatro álabes con las dos técnicas experimentales.

Alabe Designación	Frecuencia [Hz]	
	Acelerómetros	Vibrómetro
53	59±1	60±1
1705	58±1	56±1
1708	58±1	58±1
1773	59±1	60±1

Durante el trabajo experimental se trató de mantener las mismas condiciones de sujeción del álabe al dispositivo de montaje en todos los ensayos. Dada la forma del montaje, la rigidez aportada al álabe no es exactamente la misma en todos los casos, y esta puede ser una de las causas de las fluctuaciones de las mediciones.

La comparación entre los resultados obtenidos con los modelos del MEF que se observan en la Tabla 5.2 muestra que las frecuencias estimadas son consistentes con las frecuencias medidas experimentalmente que se muestran en la Tabla 5.3 para un

álabe libre de fallas en el rango de 0 a 400 Hz. Hay modos que no se observaron en los modelos pero que fueron registrados en ambas mediciones experimentales en el rango mencionado anteriormente.

Tabla 5.2. Resultados del MEF para el modelo de viga y modelo 3D.

MEF		MEF	
Modelo de viga		Modelo 3D	
63,8 Hz	Flexión-dir. Z	74,8 Hz	Flexión
209,2 Hz	Flexión-dir. Z	191,4 Hz	Flexión
369,5 Hz	Flexión-dir. Y	347,9 Hz	Torsión
481,2 Hz	Flexión-dir. Z	452,4 Hz	Torsión

Tabla 5.3. Resultados experimentales para un álabe libre de fallas (1705) en ambas mediciones.

Medición		Medición
Acelerómetros		Vibrómetro
58±1 Hz	Flexión	56±1 Hz
111±1 Hz	Flexión	109±1 Hz
220±2 Hz	Flexión	224±2 Hz
273±1 Hz	Torsión	271±1 Hz
322±1 Hz	Torsión	321±1 Hz

5.6. Retroalimentación del modelo 3D–Evaluación de las condiciones de ensayo

En base a las diferencias encontradas en el análisis comparativo, se realizaron modificaciones en las condiciones de sujeción en el modelo 3D del álabe. La presencia de frecuencias adicionales en las mediciones experimentales es un indicador de que las condiciones de empotramiento en el MEF, que se consideran ideales, difieren de las reales debido a la sujeción en el dispositivo. Se puede decir que el dispositivo de sujeción empleado no restringe todos los grados de libertad del álabe en la raíz.

Dado que la condición de empotramiento se puede construir a partir de un resorte con constante de rigidez infinita, la variación de la condición de sujeción en el modelo consiste en fijar a la raíz resortes con constante de rigidez finita. El modelo del álabe con su condición de sujeción en la raíz modificada se muestra en la Figura 5.6.

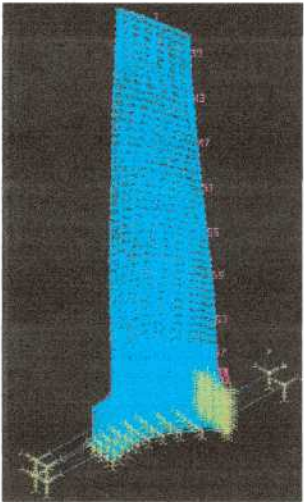


Figura 5.6. Modificación de la condición de fijación en el modelo.

Se probaron varias condiciones de sujeción en la raíz empleando elementos de resorte y de apoyo simple. En la Tabla 5.4 se muestran los mejores resultados obtenidos, a criterio del autor. Comparados con los de la Tabla 5.3 se puede decir que conforme disminuye la rigidez en la sujeción, aparecen más frecuencias en el sistema y los valores de frecuencia tienden a disminuir. Es importante mencionar que se pueden producir cambios en las condiciones reales de sujeción del álabe en el disco rotatorio a medida en que la turbina envejece.

Tabla 5.4. Comparación del MEF modificando su condición de sujeción con los resultados experimentales para un álabe libre de fallas (1705).

MEF	Medición	Medición
Modelo 3D Modificado	Acelerómetros	Vibrómetro
62,3 Hz	57,7 Hz	56,4 Hz
99,0 Hz	111,3 Hz	108,8 Hz
181,5 Hz	220,0 Hz	223,8 Hz
200,1 Hz	273,2 Hz	270,9 Hz
346,1 Hz	322,0 Hz	320,9 Hz

Cabe recalcar que los cambios realizados en la condición de sujeción del modelo son para ajustarse a la condición de sujeción del dispositivo experimental pero no son representativos de la condición de sujeción durante la operación del álabe en la turbina.

5.7. Otras técnicas de excitación y de medición

Se ha considerado poco confiables los resultados que se obtuvieron haciendo vibrar al álabe con una excitación magnética, porque este tipo de excitación perturba no solo al álabe sino también a otros elementos del sistema. Debido a la poca rigidez estructural de los soportes sobre los que se colocan las bobinas excitadoras, al realizar el barrido en frecuencia con la excitación magnética se sintonizaron también las frecuencias de vibración de estos elementos.

Acerca del método de medición de deformaciones de un fleje con sensores ópticos, se consideraron dos casos, dado que se emplearon dos tipos de sensores ópticos. En ambos se hizo una comparación respecto a la respuesta de un sensor de deformación convencional.

Analizando la respuesta del sensor os1100, el cual se adhirió a la superficie del material ensayado embebiéndolo en resina, el sensor óptico y el convencional tuvieron el mismo comportamiento lineal, difiriendo en promedio un 7% como se aprecia en la Figura 4.42.

En el segundo caso, el sensor os3120 consta de una estructura metálica. Para él se debió de tener en cuenta los siguientes factores: el proceso de pegado y la corrección por carga de flexión. Un proceso malogrado de pegado provoca invasión de resina en el canal donde se ubica la fibra óptica, con lo cual la medición se altera, como se aprecia en los resultados de los sensores os3120 de longitud de onda $\lambda=1572$ nm y $\lambda=1552$ nm. En la deformación de una viga en voladizo sometida a flexión se produce una tensión en las secciones del material que se encuentran por encima de la superficie neutra y una compresión para las que se encuentran por debajo de ésta. Como vimos en el Capítulo 3, el esfuerzo en cualquier sección es directamente

proporcional a su distancia (y) a la superficie neutra, por lo tanto su deformación también lo será. La estructura metálica del sensor provoca que la fibra óptica esté separada de la superficie de ensayo, lo cual incrementa la respuesta del sensor. Estos sensores ópticos tienen un factor de celda, f , empleado para realizar una corrección por temperatura dado que ésta afecta el índice de refracción de la red de Bragg y provoca un cambio en la longitud de onda. También fue necesaria una corrección debida a la carga por flexión ya que la fibra se encuentra separada del material. Para el sensor os3120 con $\lambda=1536$ nm el factor de celda empleado es $f=1,27$. Este factor se determinó geométricamente considerando la geometría del sensor y el esquema de deformaciones mostrado en la Figura 3.14. Finalmente, comparando con el sensor convencional, se aprecia en los resultados de la Figura 4.42 que ambos tuvieron el mismo comportamiento lineal, sus respectivas pendientes están muy cercanas y las mediciones difieren en promedio un 5%.

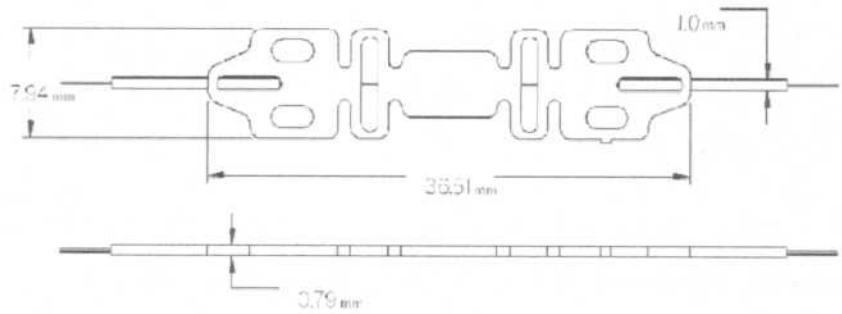


Figura 5.7. Geometría del sensor os3120.

Finalmente, se decidió no seguir adelante con este método debido a varios factores:

1. Resultados poco confiables observados en la excitación magnética.
2. Riesgo de realizar un proceso incorrecto de pegado.
3. Geometría irregular del álabe que dificulta el pegado.

Se pueden mejorar estas condiciones, por ejemplo usando el os1100, pero se abandonó esta posibilidad por ahora por falta de tiempo y presupuesto (los os1100 no pueden ser reutilizados al ser embebidos en resina).

5.8. Sugerencias

Para posibles trabajos a futuro, se sugiere:

- Mejorar la representación geométrica del modelo simplificado de viga, considerando la inercia rotatoria para que los resultados se ajusten más a las mediciones experimentales.
- Incorporar el análisis fractomecánico en el modelo para estudiar el comportamiento de las frecuencias de resonancia considerando las longitudes de fisura presentes en el álabe.
- Evaluar las condiciones de sujeción del modelo considerando las ranuras de fijación tanto en el álabe como en el disco rotatorio sobre las cuales se acoplan.
- Mejorar el dispositivo de sujeción empleado en el laboratorio para garantizar la repetitividad de las condiciones de vínculo del álabe a la estructura de sujeción.
- Disminuir la frecuencia máxima de barrido para así aumentar la resolución en frecuencia.
- Evaluar la respuesta del álabe en función de la amplitud de vibración.

6. CONCLUSIONES

En el laboratorio de óptica y láser se llevó a cabo la primera experiencia de un escaneo tridimensional en un álabe de turbina de vapor de la etapa de baja presión. Dada la complejidad de la geometría y tomando como referencia mediciones anteriores, los resultados obtenidos fueron mucho más voluminosos en cuanto a datos que proporciona el método y en exactitud. El posterior análisis para conocer el comportamiento mecánico del álabe a partir de la geometría obtenida implicó un reprocesamiento de los datos por algunos programas computacionales.

A partir de los datos obtenidos con el escaneo tridimensional se propusieron dos modelos y se estimaron las frecuencias de resonancia. El primero es un modelo simplificado de una línea segmentada en varios tramos, con las propiedades geométricas y mecánicas del material correspondientes. El segundo es un modelo más elaborado en tres dimensiones, y dio como resultado valores en frecuencia similares al modelo anterior, pero mostrando el comportamiento correspondiente a cada valor de frecuencia, es decir flexión o torsión.

Las frecuencias de resonancia estimadas con ambos modelos fueron contrastadas con mediciones experimentales; se encontró similitud entre los modelos teóricos y dichas mediciones tanto en los valores en frecuencia como en el modo de respuesta. Las diferencias entre los resultados experimentales y el modelo MEF nos llevó a la retroalimentación del modelo para mejorar los resultados, con lo que se llegó a concluir que las modificaciones en la sujeción en la raíz modifican el comportamiento dinámico del álabe, que a su vez puede influir en la vida de la turbina a medida que ésta envejece.

En las mediciones experimentales no se encontró evidencia suficiente para distinguir entre las frecuencias de resonancia de un álabe libre de fallas y uno retirado de servicio ya que los valores de frecuencia obtenidos no presentan diferencias significativas dentro del error de medición. Por lo tanto se concluye que las

características de las fisuras presentes en el álabe no alteran la respuesta del componente sometido a un ensayo de impacto.

Se sugiere una posible evaluación histórica de estos componentes, es decir, caracterizarlo antes de que entre en funcionamiento y hacerle un seguimiento durante las paradas programadas, para averiguar si existe una variación en la respuesta del componente a lo largo de su vida en servicio.

Queda pendiente en este estudio la excitación magnética del álabe y la medición de deformaciones con los sensores de fibra óptica. La caracterización de estos sensores nos lleva a la conclusión que el sensor apto para ese ensayo, una vez que se mejore el método de excitación y el dispositivo de sujeción, sería el sensor os1100 (embebido en resina).

El estudio de los álabes presentado en esta tesis es sólo el comienzo de los estudios que se podrían llevar a cabo con distintos enfoques. Las simulaciones computacionales podrían incluir el fluido en movimiento, velocidad de operación, cargas dinámicas, anclaje, entre otros.

Bibliografía

- [1] Antúnez, J., Terminación de la Central Nuclear Atucha II, Comisión Nacional de Energía Atómica, Boletín Energético, 2005, 8(16): 3–8.
- [2] Mukhopadhyay, N., Ghosh Chowdhury, S., Das, G., Chattoraj, I., Das, S. K., and Bhattacharya, D., An Investigation of the failure of low pressure steam turbine blades, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 5, No. 3, pp. 181–193, 1998.
- [3] Iorio, A., Crespi, J., Failure Analysis of Turbine Blades, *Handbook of Case Histories in Failure Analysis*, Vol. 2, K.A. Esakul, Ed., ASM International, 1992, pp 289-294.
- [4] Ebara, R., Corrosion fatigue phenomena learned from failure analysis, *Engineering Failure Analysis*, Volume 13, Issue 3, 2006, pp. 516-525.
- [5] Wang, W.Z., Xuan, F.Z., Zhu, K.L., Tu, S.T., Failure analysis of the final stage blade in steam turbine, *Engineering Failure Analysis*, Volume 14, Issue 4, June 2007, pp. 632-641.
- [6] Floyd Gelhaus, SCC in Steam Turbine Materials, Corrosion in the Nuclear Power Industry, *Corrosion*, Vol. 13, *ASM Handbook*, ASM International, 1992 , pp. 2526–2543.
- [7] Spinosa, C., Estudio No destructivo de Fallas en Álabes de Turbina. (V CORENDE), ISBN: 987-1154-66-6, pp. 355–359, Neuquén, Argentina, 2-4 de Noviembre de 2005.
- [8] Krämer, E., Huber H., Scarlin B., Reequipamiento de turbinas de vapor a baja presión, *Revista ABB*, 5/1996, pp. 4–13.
- [9] Información procedente del Área de mantenimiento de CNA I, Nota 165000 nº 104/05.
- [10] Lovejoy, P., Structure and constitution of Wrought Martensitic Stainless Steels, *Handbook of Stainless Steels*, Peckner D. and Bernstein I.M., Ed., McGraw-Hill, 1977

- [11] Washko, S. and Aggen G., Wrought Stainless Steels, Tensile Properties: *Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys*, Vol. 1. *ASM Handbook*, ASM International, 1992, pp. 2042–2075.
- [12] Washko, S. and Aggen G., Classification of Stainless Steels, Wrought Stainless Steels, *Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys*, Vol. 1, *ASM Handbook*, ASM International, 1992, pp. 2006–2021.
- [13] Ciulik, J., Failure Analysis of a Cracked Low-Pressure Turbine Blade, *Handbook of Case Histories in Failure Analysis*, Vol. 2, K.A. Esakul, Ed., ASM International, 1992, pp. 280-282.
- [14] Ruglic, T., Flame Hardening of Steels, *Heat Treating*, Vol., 4, *ASM Handbook*, ASM International, 1992, pp. 625-665.
- [15] Marder, A., Heat Treatment Coatings, Effects of Surface Treatments on Materials Performance, *Materials Selection and Design*, Vol. 20, *ASM Handbook*, ASM International, 1992, pp. 1150-1163.
- [16] Heitkemper, M., Bohne, C., Pyzalla, A., Fischer, A., *Int. J. Fatigue* 25 (2003) 101. (Original no consultado, citado por: Lee, M., Kim, G.H., Kim, K.H., Kim, W.W., en: Control of surface hardnesses, hardening depths, and residual stresses of low carbon 12Cr steel by flame hardening, *Surface and Coatings Technology*, 184 (2004), pp. 239-246).
- [17] Krauss, G., Martensite in Steel: strength and structure. *Materials Science and Engineering A* 273-275 (1999) 40-57.
- [18] Stuecker, E., Gartner, G., Hamel, H., Experience with residual Stress Measurements at Last Stage LP-Turbine Blades, *EPRI Steam and Combustion Turbine Blading Conference and Workshop* (1992).
- [19] Rao, J.S., *Turbomachine Blade Vibration*, Wiley Eastern Limited, New Delhi, India, 1991.
- [20] Zielinski, M., Ziller, G., Noncontact Blade Vibration Measurement System for Aero Engine Application, ISABE-2005-1220.

- [21] Mazur, Z., García-Illescas, R., Porcayo-Calderón, J., Last stage blades failure analysis of a 28MW geothermal turbine, *Engineering Failure Analysis*, Volume 16, Issue 4, 2009, pp. 1020-1032.
- [22] Mazur, Z., Hernández-Rossette, A., García-Illescas, R., Investigation of the failure of the L-0 blades, *Engineering Failure Analysis*, Volume 13, Issue 8, 2006, pp. 1338-1350.
- [23] Villagarcía, M. P., Análisis de integridad estructural de una turbina de vapor, Tesis para optar al título de Magíster en Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad Nacional de General San Martín, Comisión Nacional de Energía Atómica, Instituto de Tecnología "Profesor Jorge A. Sabato", 1997.
- [24] Charlesworth, C., Phased array ultrasonic inspection of low pressure steam turbine rotors, Curved Axial Entry Fir tree roots, *Insight*, 53(2), February 2011.
- [25] ASTM Standard, E 1316-04 Standard Terminology for Nondestructive Examinations, *Nondestructive Testing*, ASTM 2004, Vol. 03-03.
- [26] Bixby, C., Laser Inspection, *Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, pp. 12-17.
- [27] Wagner, J., Vibration Analysis of Turbine and Propeller Blades, Optical Holography, *Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, pp. 424-427.
- [28] Genest, D., CMM Measurement Techniques, Coordinate Measuring Machines, *Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, *ASM Handbook*, ASM International, 1992, pp. 18-19.
- [29] Greene, A., et al, Design of a Rapid, High Sensitivity Real-Time Radiographic System, Radiographic Inspection, *Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, pp. 321-323.
- [30] Dennis, M., Industrial CT Applications, Industrial Computed Tomography, *Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, pp. 362-366.

- [31] Berger, H., Use of Neutron Radiography to Detect Core Material Still Remaining in the interior Cooling Passages of Air-Cooled Turbine Blades, Neutron Radiography, *Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, pp. 393-394.
- [32] Kessler, L., Acoustic Microscopy, *Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, pp. 465-466.
- [33] Smiley, L., et al, Methods for Detecting Internal Discontinuities, Nondestructive Inspection of Castings, *Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, pp. 512.
- [34] Rickards, P., Progress in Guaranteeing Quality Through Nondestructive Methods of Evaluation, *Foundryman Int.*, 1988, pp 196-209. (Original no consultado, citado por Smiley, L., en: Common Inspection Procedures, Nondestructive Inspection of Castings, *Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, pp. 512-520).
- [35] Generación Nucleoeléctrica, Comisión Nacional de Energía Atómica, Boletín Energético, 2010, 8(25): 40.
- [36] Oggianu, S., Simulación del comportamiento dinámico de la turbina de vapor de la CNAI ante un transitorio de rechazo de carga, 1995.
- [37] Guala, J., Parada de Actualización y Mantenimiento de la Central Nuclear Atucha I, Comisión Nacional de Energía Atómica, Boletín Energético, 2003, 6(11): 3-12.
- [38] Ruch, M., Relevantamiento geométrico de un álabe con lecturas directas sobre el plano, 2010.
- [39] Neyra, M., Ortega, V., Nuñez, N., Ruzzante, J., López, M., Marengo, J., Marengo F., Ruido Barkhausen en álabes de turbina, VIII CORENDE, Campana, 2011.
- [40] Ewins, D., Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press, Herts., U.K., 1986.

- [41] Zagorchev, L., Goshtasby, A., A paint-brush laser scanner, *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 101, 2006, pp. 65-86.
- [42] Blais, F., Review of 20 Years of range Sensor Development, *Journal of electric Imaging*, 13(1): 231-240, January 2004.
- [43] Winkelbach, S., Molkenstruck, S., and Wahl F., "Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach", DAGM 2006, LNCS 4174, Eds: Franke K. et al, pp 718 – 728, 2006.
- [44] Fischler, M.A., Bolles, R.C., Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM* 24(6) (1981) 381–395.
- [45] Malacara, D., Malacara Z., *Optical Metrology, Handobook of Optics, Devices, measurements and properties*, Second Edition, Vol. 2, Bass, M (Ed), U.S., 1995.
- [46] Halkon, B., *Turbomachinery Blade Vibration Analysis*, Supervisor: Rothberg, S.J., Loughborough University, The Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, 2002.
- [47] Greivenkamp, J., *Interference, Handobook of Optics, Fundamental, Techniques and Design Devices*, Second Edition, Vol. 2, Bass, M. (Ed), U.S., 1995.
- [48] Cielo, P., *Optical Techniques for Industrial Inspection*, Academic Press, Inc., U.K., 1988.
- [49] User Manual, Portable Vibrometer VH-1000-D, Ometron, U.K.
- [50] Gasvik, K., *Optical Metrology*, John Wiley & Sons Ltd., U.K., 1987.
- [51] Ruiz Gale, M., *Fibras Ópticas y Sensores, Métodos Ópticos aplicados a los END*, Hogert, E., Ruiz Gale M. (Eds), 2010.
- [52] Handerek, V., *Foundations of Optical Fiber Technology, Optical Fiber Sensor Technology*, Fundametals, Grattn, K., Meggita. B. (Eds), Vol. I, Netherlands, 1998.

- [53] Handerek, V., Devices and Technology, *Optical Fiber Sensor Technology, Fundamentals*, Grattan, K., Meggit. B. (Eds), Vol. II, Netherlands, 1998.
- [54] Optical Fiber Sensors Guide Fundamentals & Applications, Micron Optics.
- [55] Subrahmanyam, K., Kulkarni, S., Rao, J.S., Application of the Reissner Method to derive the coupled bending-torsion equations of dynamic motion of rotating pretwisted cantilever blading with allowance for shear deflection, rotator inertia, warping and thermal effects, *Journal of sound and Vibration* (1982) 84(2), pp. 223-240.
- [56] Özdemir, Ö., Kaya, M., Flapwise bending vibration analysis of a rotating tapered cantilever Bernoulli-Euler beam by differential transform method, *Journal of Sound and Vibration* 289(2006), pp. 413-420.
- [57] Gupta R.S., Rao, S.S., Finite Element Eigenvalue Analysis of tapered and twisted Timoshenko beams, *Journal of Sound and vibration* (1978)56(2), pp 187-200.
- [58] Thomas J., Abbas, B., Finite Element Model for dynamic analysis of Timoshenko beam, *Journal of Sound and Vibration* (1975)41(3), pp. 291-299.
- [59] Coro, A., Martínez, A., Ortiz, J., del Val, J., *Manual de Cálculo de Vibraciones*, ITP, 2002.
- [60] Chen, Shun-zhang and LI, Lu-ping, 3D Modeling and Finite Element analysis of Dynamic Characteristics for Blades of Wind Turbine, 978-1-4244-4813-5/10©2010IEEE.
- [61] Kim Hyo-Jim, Fatigue failure analysis of last stage blade in a low pressure steam turbine, *Engineering Failure Analysis* 6 (1998), pp. 93-100.
- [62] Xu, Zi-Li; Park, Jong-Po; Ryu, Seok-Ju, Failure analysis and retrofit design of low pressure 1st stage blades for a steam turbine, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 14, Issue 4, June 2007, pp. 694-701.
- [63] Apuntes de Curso de Vibraciones.

- [64] Singeresu S. Rao, Mechanical Vibration, Adison-Wesley Publishing Company, Pardue University, United States of America, Third Edition 1995.
- [65] Service, T., Principles and Practice of Failure Analysis, Finite Element Modeling in Failure Analysis, Failure Analysis and Prevention, Vol. 11, *ASM Handbook*, ASM International, 1992, pp. 802-811.
- [66] FEA-Opt Technology.
(Disponible en: http://www.fea-optimization.com/ansys/index_e.htm, consultado el 3 febrero de 2012).
- [67] COSMOS/M 2.7, Basic System Finite Element Analysis, Part 1, First Edition, 2010.
- [68] Singer, F., Pytel, A., Resistencia de Materiales, Cuarta Edición, HARLA, México, 1994.
- [69] Bonifacio, K., Romero, R., Determinación de las frecuencias naturales de un álabe de turbina de vapor de CNA-I, IN-13-E-052-EE/11.
- [70] Bonifacio, K., Romero, R., CARACTERIZACION DINAMICA DE ALABES DE TURBINA DE VAPOR DE CNA-I. IN-13-E-074-EE/11.
- [71] Gade, S., Møller, N., Jacobsen, N., and Hardonk, B., Modal Analysis using a Scanning Laser Doppler Vibrometer, Brüel & Kjær, Denmark.

Anexos

Anexo A

Tabla A.1. Presiones admisibles en la turbina [23]

Entrada del vapor en la etapa de alta presión	0,43 Mpa
Salida de la etapa de alta presión	0,06 Mpa
De lante de las carcasa de entrada de etapa baja presión	0,05 Mpa

Tabla A.2. Estado del vapor en las extracciones. Cada una de las etapas de baja presión posee un sistema de tres extracciones de vapor, denominados en orden decreciente A3, A2, A1 [23]

Extracción	Caudal [tn/hr]	Presión [Pa]	Temperatura [°C]	Entalpía [kcal/Kg]
A1	28,03	310	70	569
A2	20,85	735	91.3	585
A3	87,8	2364	125	614

Anexo B1

Frecuencia natural del álabé con fisura.

Configuración $A_0 - F_0$: La Figura B1.1 muestra la respuesta del álabé a la excitación por impacto de los sensores 1 y 2 para la primera configuración A_0-F_0 . La primera frecuencia natural es 59,250 Hz, valor que se corresponde con el orden de magnitud obtenido en el modelo de MEF. La diferencia de fase entre los sensores S1-S2 para esa frecuencia es de 1,3° como resulta del espectro cruzado, en fase, que se muestra en la Figura B1.2.

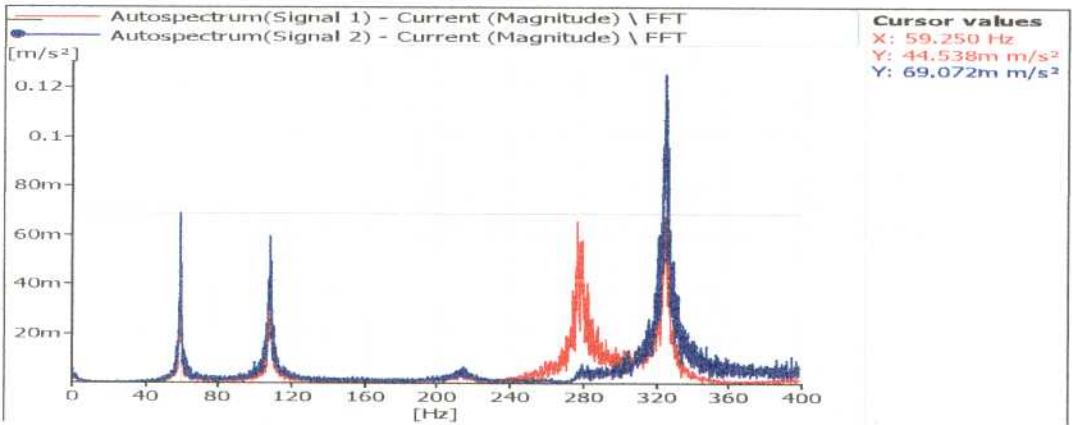


Figura B1.1. Autoespectro de frecuencia de 0 a 400 Hz de respuesta del álabé con fisuras correspondiente a los sensores 1 y 2. Configuración A_0-F_0 . $n = 1$, $f_1 = 59,250$ Hz.

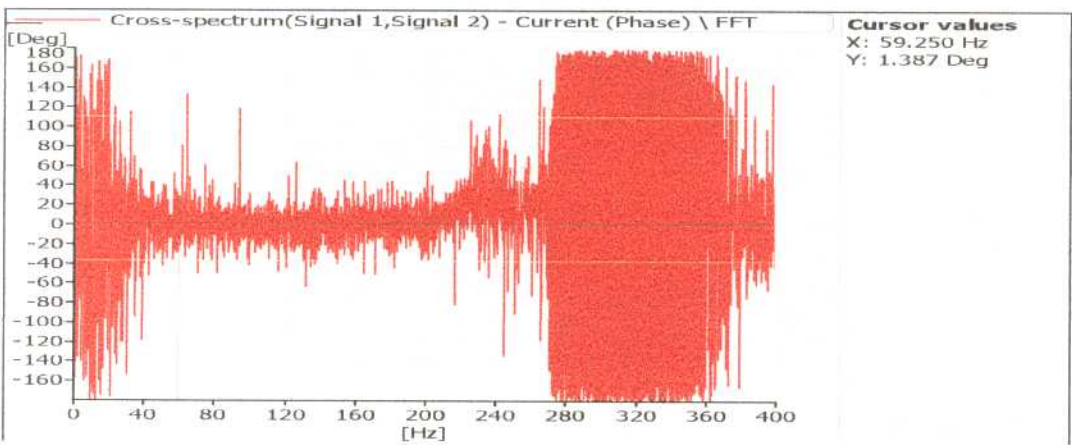


Figura B1.2. Espectro de diferencia de fase entre los sensores S1 – S2 correspondiente al ensayo de la Figura B1.1. Configuración A_0-F_0 . $n = 1$, $f_1 = 59,250$ Hz.

Configuración $F_0 - F_9$: Los autoespectros obtenidos para la configuración F_0-F_9 de la respuesta del álabe al ensayo de impacto se muestran en la Figura B1.3, con una primera frecuencia $f_1 = 59,250$ Hz. La diferencia de fase entre las señales de los acelerómetros S1-S2 resulta para esa frecuencia de $-0,5^\circ$, como se muestra en el espectro cruzado de la Figura B1.4.

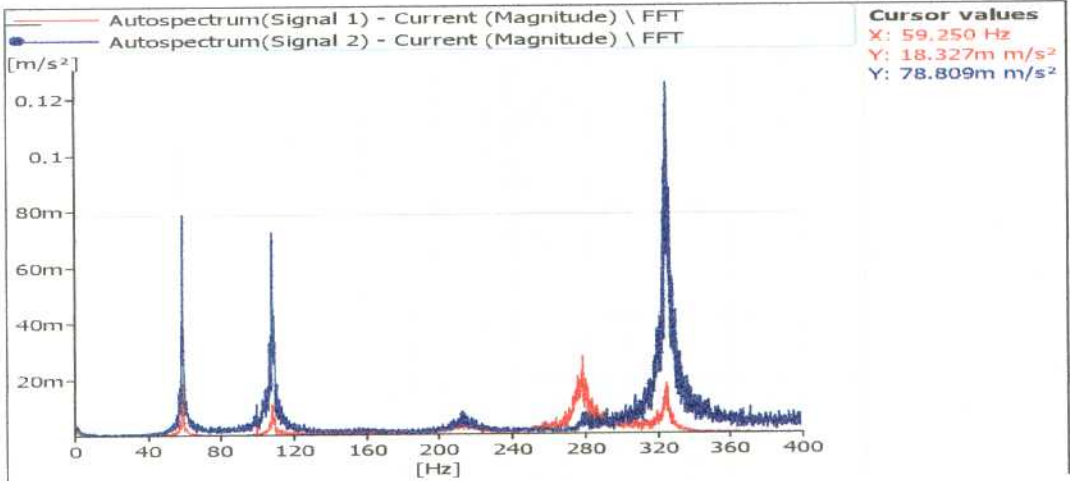


Figura B1.3. Autoespectro de frecuencia de 0 a 400 Hz de respuesta del álabe con fisuras correspondiente a los sensores 1 y 2. Configuración F_0-F_9 . $n = 1$, $f_1 = 59,250$ Hz.

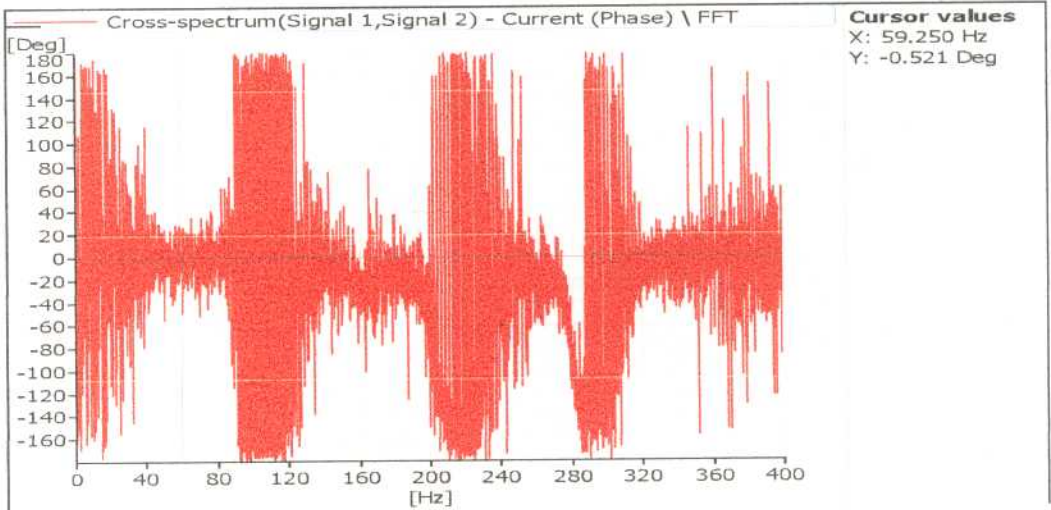


Figura B1.4. Espectro de diferencia de fase de los sensores S1-S2 correspondiente al ensayo de la Figura B1.3. Configuración F_0-F_9 . $n = 1$, $f_1 = 59,250$ Hz.

Frecuencia natural del álabe con fisura

Frecuencias naturales de modos $n > 1$ de álabe con fisuras.

Se presenta una caracterización de los autoespectros en las diferentes configuraciones, obtenidos como respuesta del álabe a los diferentes impactos y en el rango de frecuencias de 0 a 400 Hz.

Tabla B1.1. Picos de frecuencia encontrados en el ensayo de impacto y ángulo de fase entre sensores S1–S2.

Frecuencias naturales álabe con fisuras para cada modo [Hz]					
	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
Configuración A ₀ –F ₀	59,250	108,500	213,750	278,255	325,755
Configuración F ₀ –F ₉	59,250	108,625	213,875	278,125	325,375
Vibrómetro láser	60,645	114,450	217,500	278,750	328,900
Fase correspondiente entre sensores S1–S2 [°]					
	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
Configuración A ₀ –F ₀	1,3	-0,1	-0,6	179,2	179,8
Configuración F ₀ –F ₉	-0,5	179,4	178,4	2,7	2,0

De la Tabla B1.1 se tiene que los modos primero, segundo y tercero corresponde a flexión, el cuarto y quinto modo de vibración corresponden a modos torsionales.

Anexo B2

Frecuencia natural del álabe 1705.

Configuración $A_0 - F_0$: La Figura B2.1 muestra la respuesta del álabe a la excitación por impacto de los sensores 1 y 2 para la primera configuración A_0-F_0 . La primera frecuencia natural es 57,750 Hz, valor que se corresponde con el orden de magnitud obtenido en el modelo de MEF. La diferencia de fase entre los sensores S1-S2 para esa frecuencia es de $-0,3^\circ$ como resulta del espectro cruzado, en fase, que se muestra en la Figura B2.2.

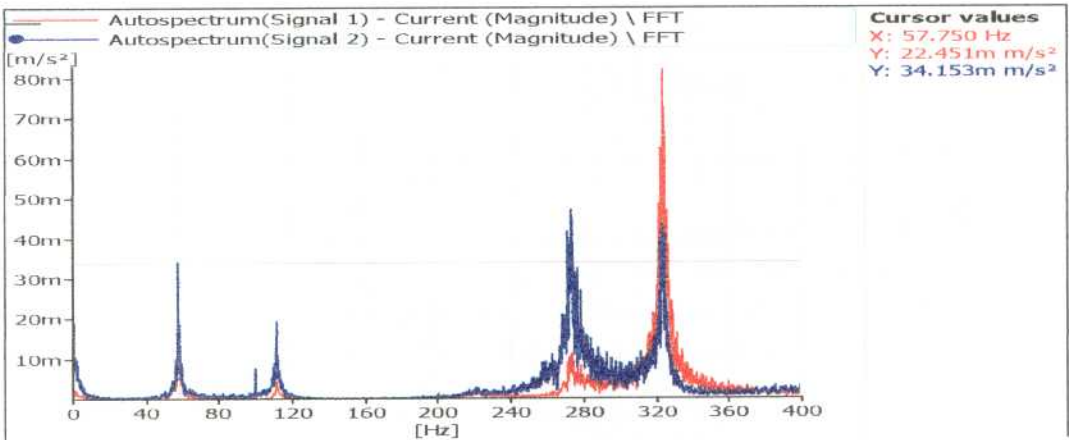


Figura B2.1. Autoespectro de frecuencia de 0 a 400 Hz de respuesta del álabe 1705 correspondiente a los sensores 1 y 2. Configuración A_0-F_0 . $n = 1$, $f_1 = 57,750$ Hz

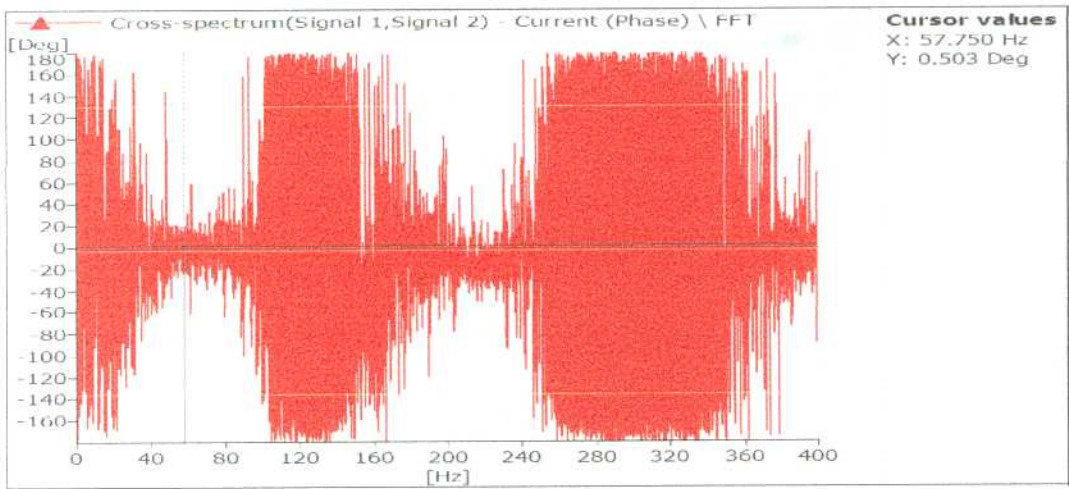


Figura B2.2. Espectro de diferencia de fase de los sensores S1-S2 correspondiente al ensayo de la Figura B2.1. Configuración $A_0 - F_0$. $n = 1$, $f_1 = 57,750$ Hz

Configuración F₀ – F₉: Los autoespectros obtenidos para la configuración F₀–F₉ de la respuesta del álabe 1705 al ensayo de impacto se muestran en la Figura B2.3, con una primera frecuencia $f_1 = 58,000$ Hz. La diferencia de fase entre las señales de los acelerómetros S1–S2 resulta para esa frecuencia -0,0°, como se muestra en la Figura B2.4.

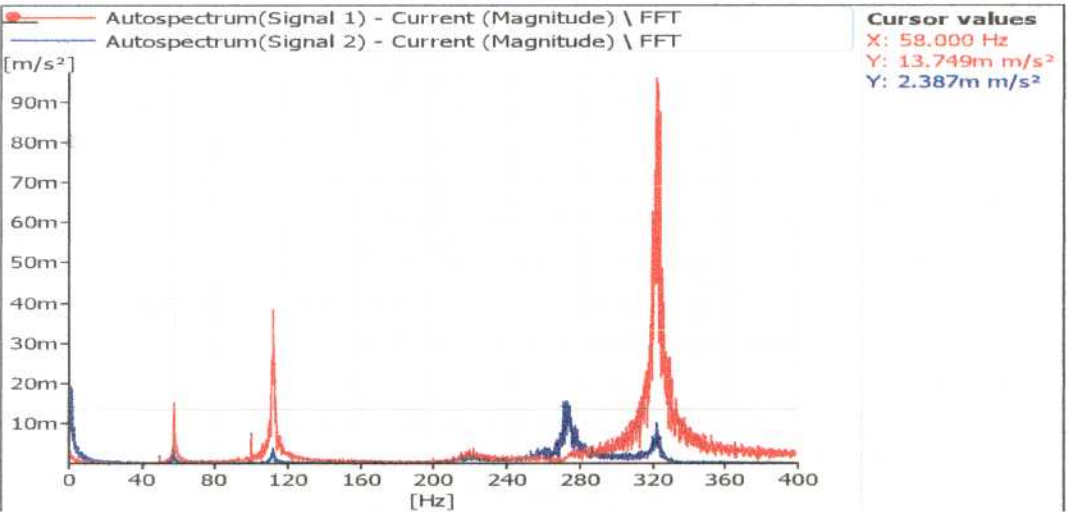


Figura B2.3. Autoespectro de frecuencia de 0 a 400 Hz de respuesta del álabe 1705 correspondiente a los sensores 1 y 2. Configuración F₀–F₉. n = 1 , $f_1 = 58,000$ Hz

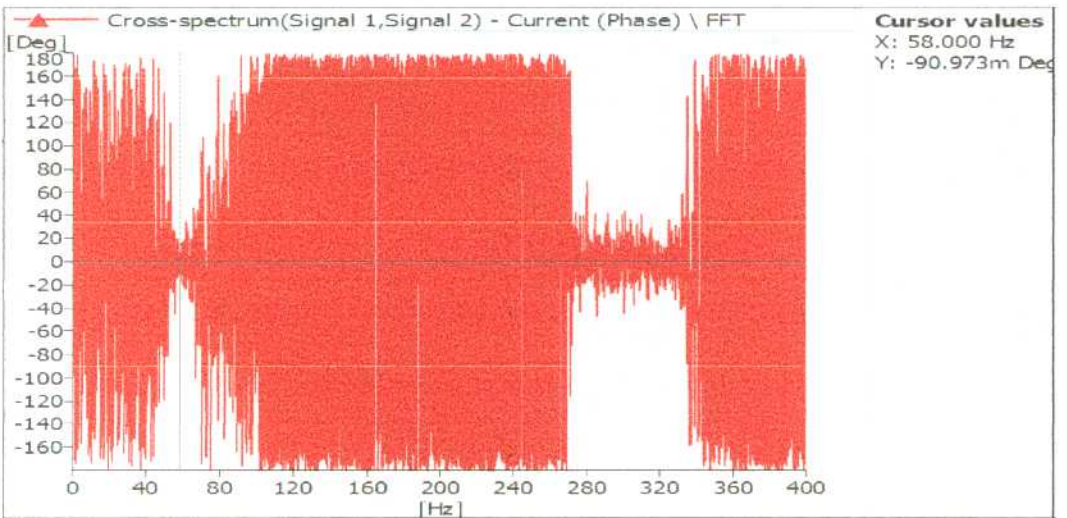


Figura B2.4. Espectro de diferencia de fase de los sensores S1–S2 correspondiente al ensayo de la Figura B2.3. Configuración F₀–F₉. n = 1 , $f_1 = 58,000$ Hz.

Frecuencias naturales de modos $n > 1$ de álabe 1705

A continuación se presenta una caracterización de los autoespectros en las diferentes configuraciones, obtenidos como respuesta del álabe 1705 a los impactos y en el rango de frecuencias de 0 a 400 Hz.

Tabla B2.1 Picos de frecuencia encontrados en el ensayo de impacto y ángulo de fase entre sensores S1–S2.

Frecuencias naturales álabe 1705 para cada modo [Hz]					
	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
Configuración A ₀ –F ₀	57,625	112,125	221,500	274,250	323,625
Configuración F ₀ –F ₉	58,000	112,125	221,625	273,125	323,375
Vibrómetro láser	57,500	110,500	222,450	271,750	322,125
Fase correspondiente entre sensores S1–S2 [°]					
	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
Configuración A ₀ –F ₀	-0,3	-2,8	-1,6	178,7	-179,0
Configuración F ₀ –F ₉	-0,0	177,2	-179,0	-2,2	-0,2

Anexo B3

Frecuencia natural del álabé 1708.

Configuración $A_0 - F_0$: La Figura B3.1 muestra la respuesta del álabé a la excitación por impacto de los sensores 1 y 2 para la primera configuración A_0-F_0 . La primera frecuencia natural es 58,250 Hz, valor que se corresponde con el orden de magnitud obtenido en el modelo de MEF. La diferencia de fase entre los sensores S1-S2 para esa frecuencia es de $-1,0^\circ$ como resulta del espectro cruzado, en fase, que se muestra en la Figura B3.2.

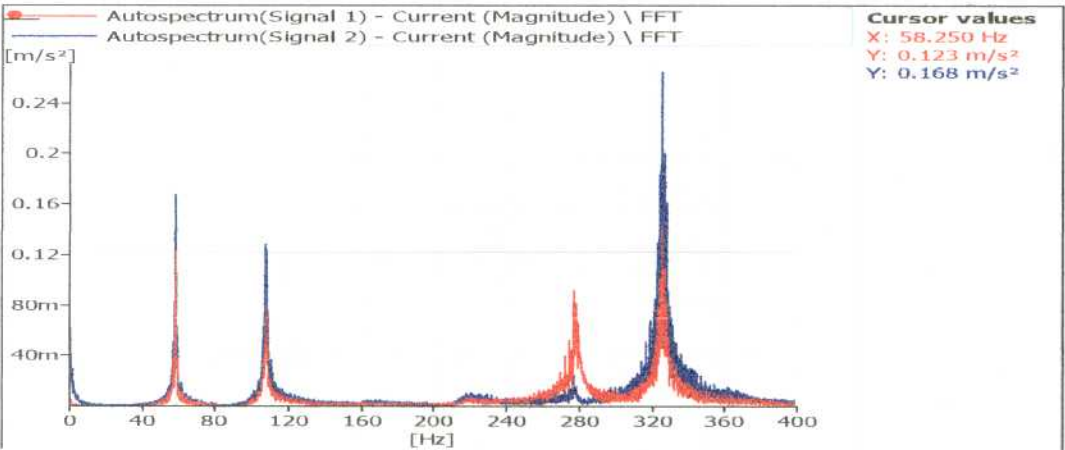


Figura B3.1. Autoespectro de frecuencia de 0 a 400 Hz de respuesta del álabé 1708 correspondiente a los sensores 1 y 2. Configuración A_0-F_0 . $n = 1$, $f_1 = 58,250$ Hz.

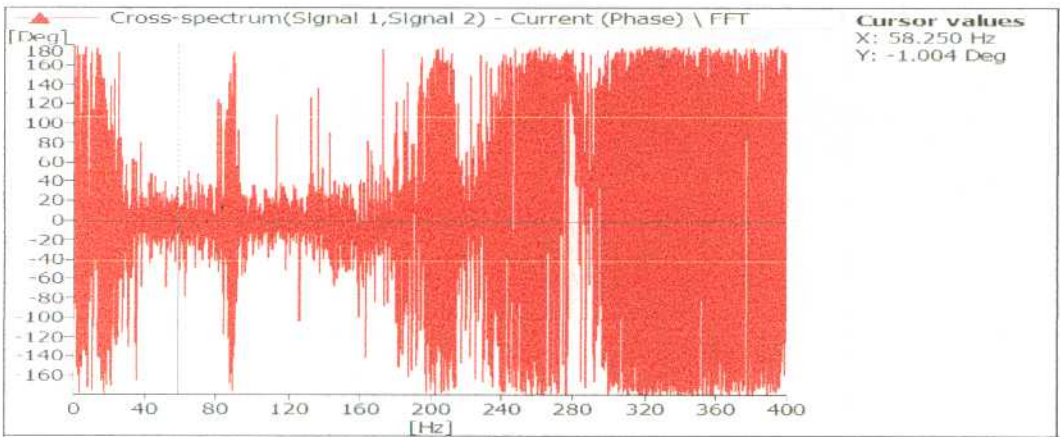


Figura B3.2. Espectro de diferencia de fase de los sensores S1-S2 correspondiente al ensayo de la Figura B3.1. Configuración A_0-F_0 . $n = 1$, $f_1 = 58,250$ Hz.

Configuración $F_0 - F_9$: Los autoespectros obtenidos para la configuración F_0-F_9 de la respuesta del álabe 1708 al ensayo de impacto se muestran en la Figura B3.3, con una primera frecuencia de 58,250 Hz. La diferencia de fase entre las señales de los acelerómetros S1-S2 resultó para esa frecuencia de 1,3°, como se muestra en la Figura B3.4.

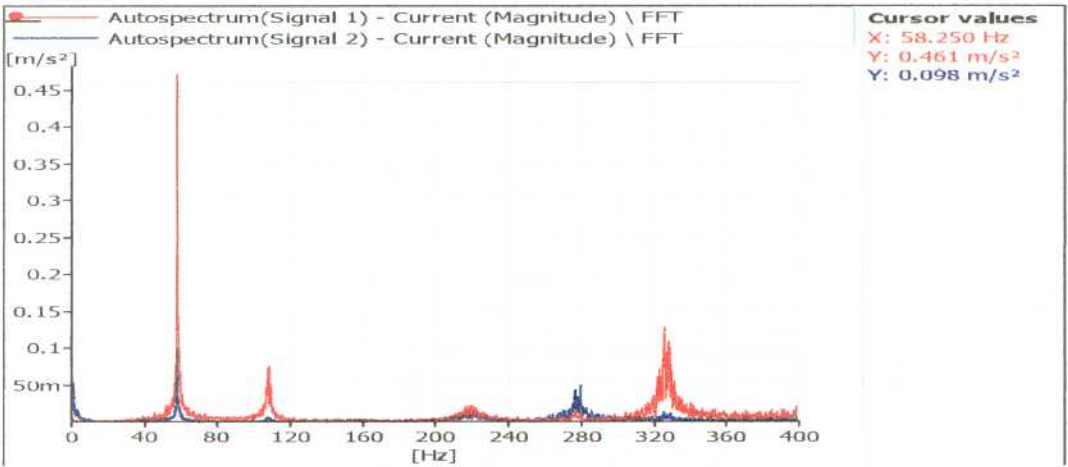


Figura B3.3. Autoespectro de frecuencia de 0 a 400 Hz de respuesta del álabe 1708 correspondiente a los sensores 1 y 2. Configuración F_0-F_9 . $n = 1$, $f_1 = 58,500$ Hz.

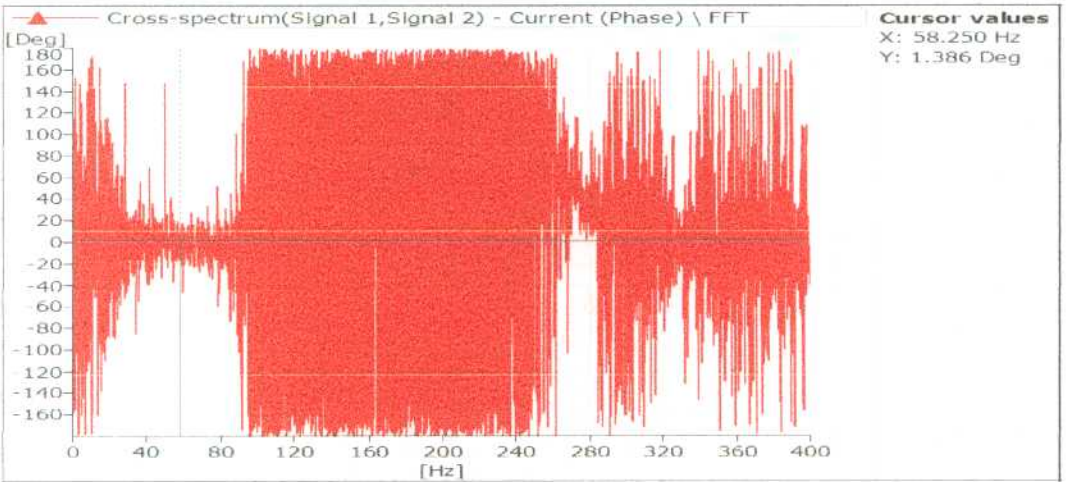


Figura B3.4. Espectro de diferencia de fase de los sensores S1-S2 correspondiente al ensayo de la Figura B3.3. Configuración F_0-F_9 . $n = 1$, $f_1 = 58,250$ Hz.

Frecuencias naturales de modos $n > 1$ de álabe 1708

A continuación se presenta una caracterización de los autoespectros en las diferentes configuraciones, obtenidos como respuesta del álabe 1708 a los impactos y en el rango de frecuencias de 0 a 400 Hz.

Tabla B3.1. Picos de frecuencia encontrados en el ensayo de impacto y ángulo de fase entre sensores S1–S2.

Frecuencias naturales álabe 1708 para cada modo [Hz]					
	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
Configuración A ₀ –F ₀	58,250	108,000	221,000	279,250	326,625
Configuración F ₀ –F ₉	58,250	108,625	220,500	279,750	326,375
Vibrómetro láser	58,250	107,500	220,950	280,625	326,500
Fase correspondiente entre sensores S1–S2 [°]					
	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
Configuración A ₀ –F ₀	-1,0	-0,6	2,1	-179,9	177,7
Configuración F ₀ –F ₉	1,3	177,9	-176,8	1,8	0,4

Anexo B4

Frecuencia natural del álabe 1773.

Configuración $A_0 - F_0$: La Figura B4.1 muestra la respuesta del álabe a la excitación por impacto de los sensores 1 y 2 para la primera configuración A_0-F_0 . La primera frecuencia natural es 59,250 Hz, valor que se corresponde con el orden de magnitud obtenido en el modelo de MEF. La diferencia de fase entre los sensores S1-S2 para esa frecuencia es de $-2,6^\circ$ como resulta del espectro cruzado, en fase, que se muestra en la Figura B4.2

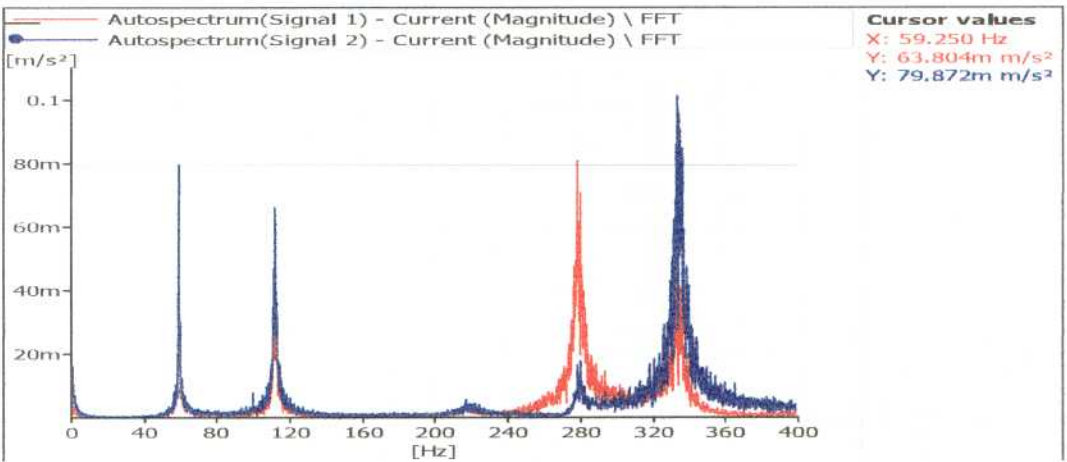


Figura B4.1. Autoespectro de frecuencia de 0 a 400 Hz de respuesta del álabe 1773 correspondiente a los sensores 1 y 2. Configuración A_0-F_0 . $n = 1$, $f_1 = 59,250$ Hz.

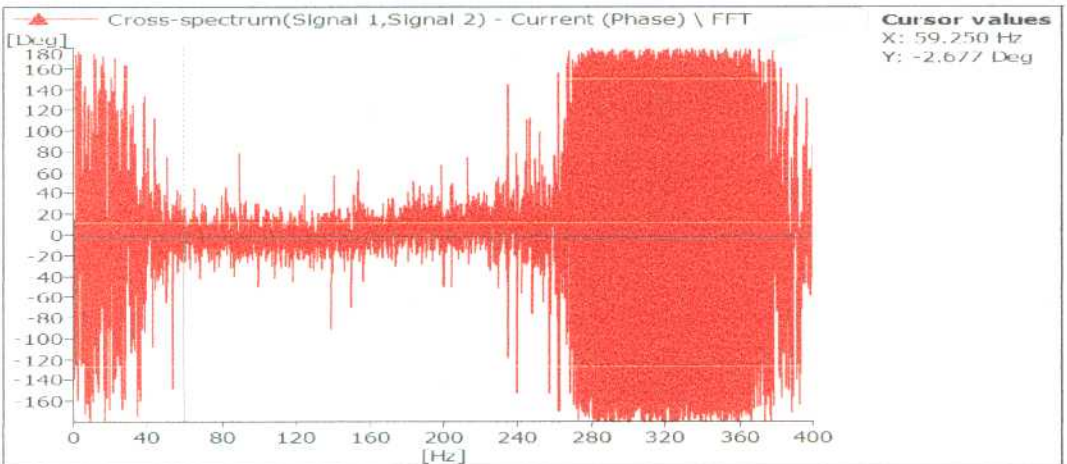


Figura B4.2. Espectro de diferencia de fase de los sensores S1-S2 correspondiente al ensayo de la Figura B4.1. Configuración A_0-F_0 . $n = 1$, $f_1 = 59,250$ Hz.

Configuración $F_0 - F_9$: Los autoespectros obtenidos para la configuración F_0-F_9 de la respuesta del álabe 1773 al ensayo de impacto se muestran en la Figura B4.3, con una primera frecuencia $f_1 = 59,250$ Hz. La diferencia de fase entre las señales de los acelerómetros S1-S2 resultó para esa frecuencia de $-0,8^\circ$ como se muestra en la Figura B4.4.

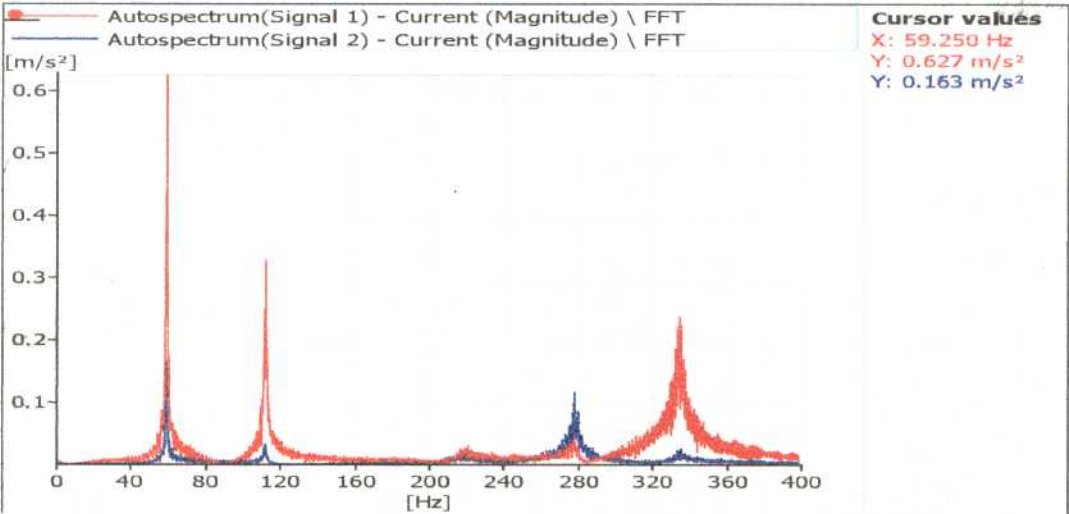


Figura B4.3. Autoespectro de frecuencia de 0 a 400 Hz de respuesta del álabe 1773 correspondiente al sensor 1. Configuración F_0-F_9 . $n = 1$, $f_1 = 59,250$ Hz.

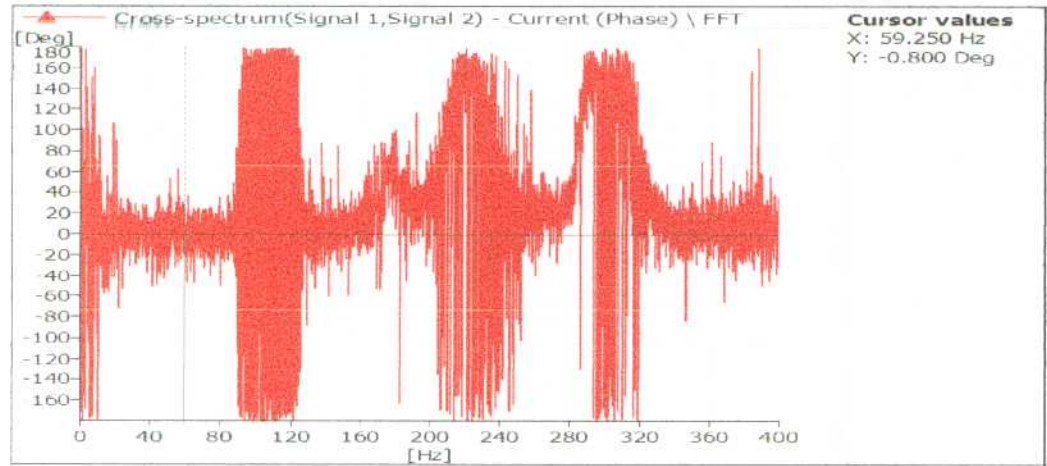


Figura B4.4. Espectro de diferencia de fase de los sensores S1-S2 correspondiente al ensayo de la Figura B4.3. Configuración F_0-F_9 . $n = 1$, $f_1 = 59,250$ Hz.

Frecuencias naturales de modos $n > 1$ de álabe 1773

A continuación se presenta una caracterización de los autoespectros en las diferentes configuraciones, obtenidos como respuesta del álabe 1773 a los impactos y en el rango de frecuencias de 0 a 400 Hz.

Tabla B4.1. Picos de frecuencia en el ensayo de impacto y ángulo de fase entre sensores S1–S2.

Frecuencias naturales álabe para cada modo 1773 [Hz]					
	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
Configuración A ₀ –F ₀	59,250	112,250	219,625	279,125	334,750
Configuración F ₀ –F ₉	59,250	112,250	219,750	279,375	335,625
Vibrómetro láser	58,750	106,000	----	271,325	321,625
Fase correspondiente entre sensores S1 – S2 [°]					
	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
Configuración A ₀ –F ₀	-2,6	2,3	-2,0	178,3	-178,4
Configuración F ₀ –F ₉	-0,8	-179,2	176,2	-0,3	-0,6