



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES MECÁNICAS DE CONDICIÓN Y DE OPERACIÓN
PARA EL MONITOREO DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

GABRIEL MELNICK D'ETIGNY

PROFESOR GUÍA:

EDUARDO SALAMANCA HENRIQUEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

VIVIANA MERUANE NARANJO

ENRIQUE LOPEZ DROGUETT

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mecánico
POR: Gabriel Melnick d'Etigny
FECHA: 17/04/2017
PROFESOR GUÍA: Eduardo Salamanca Henríquez

IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES MECÁNICAS DE CONDICIÓN Y DE OPERACIÓN PARA EL MONITOREO DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Alrededor de 20% de la energía del mundo es generada por turbinas hidroeléctricas. Como el mercado energético y la disponibilidad de los recursos hídricos son muy variables, las turbinas suelen funcionar con rangos de operación amplios. Sin embargo, estas son diseñadas sólo para un punto óptimo. La operación fuera de las condiciones de diseño puede causar pérdida de eficiencia, cavitación o vibraciones excesivas, dañinas para la instalación.

Los fenómenos antes mencionados son los que motivan este estudio: Generalmente el operador de una unidad hidroeléctrica ajusta el caudal para cumplir con los requerimientos de potencia impuestos por el ente regulador, dentro de lo que el recurso permite, manteniendo la velocidad de giro de la turbina constante para generar a 50Hz. Este tipo de control pasa por alto el deterioro que puede sufrir la unidad al operar en ciertos rangos de caudal o altura.

El objetivo de este trabajo es detectar mediante análisis de vibraciones, la ocurrencia de eventos de cavitación o vibraciones excesivas que acortan el tiempo medio entre fallas de la unidad. Para lograrlo se estudió una instalación de laboratorio en múltiples condiciones de carga para obtener patrones. Luego, en base a estos se tomaran datos en una central hidroeléctrica y se evaluará su condición.

El resultado final del trabajo es definir una forma de detectar incipientemente episodios de cavitación en la central, pudiendo evitar los regímenes de carga responsables de ellos y así prevenir la acumulación de daños o desgaste prematuro.

El trabajo comprendió: pruebas en una turbina de laboratorio, cambiando carga, caudal y RPM de operación. Posteriormente, para aplicar este modelo se tomaron datos, siguiendo el mismo protocolo, en la Central Chiburgo del grupo Colbún.

A partir de los datos de laboratorio se observa que, comparando medidas a distintas condiciones de operación, la cavitación es claramente identificable. No obstante, para establecer un patrón que permita determinar en base a una sola medida la condición del flujo, se requiere analizar diferentes variables y parámetros estadísticos como: Skewness, Kurtosis, aceleración global o crest-factor. El análisis de emisiones acústicas permite de igual manera -y directamente en tiempo real- detectar problemas.

Los parámetros que permiten identificar cavitación son monitoreables en tiempo real y permiten realizar un diagnóstico por parte del operador. La Kurtosis resultó ser una herramienta potente ya que permite detectar la aparición de cavitación incipientemente, antes de que los otros parámetros la revelen. La variación de RPM permite mejorar una condición de cavitación cuando se trabaja con caudal cercano al mínimo técnico, y podría permitir generar de forma segura aunque no se alcancen las condiciones establecidas por el fabricante.

A mi abuelo Enrique

Agradecimientos

A Andreita por estar conmigo estos años, acompañarme, apoyarme y ayudarme en todo lo que ha podido. También por confiar siempre en mí.

A mis padres por apoyarme y siempre ayudarme y darme todas las facilidades para que pudiera terminar la carrera sin presionarme.

A mis compañeros y amigos del departamento Andres, Diego, Jonatan y Roberto por todos los trabajos juntos, las anécdotas, los paseos (con tesitos!), los Martinis, y los demás momentos memorables de la carrera.

A mi profesor guía Eduardo Salamanca por confiar en mí desde un principio para trabajar este tema, por mostrar preocupación e interés por mi memoria y trabajar para sobrepasar los inconvenientes que se presentaron. Además por prestarme sus equipos para realizar mediciones y ofrecer toda su disposición.

A la profesora Viviana por estar siempre disponible para contestar mis dudas y aportar con mi trabajo, y hacer observaciones constructivas. También al profesor Enrique por facilitarnos el equipo de EA.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes generales.....	1
1.2	Motivación.....	1
1.3	Objetivo general	1
1.4	Objetivos específicos.....	1
1.5	Alcances	2
2	Metodología	3
2.1	Metodología general.....	3
2.1.1	Revisión bibliográfica	3
2.1.2	Preparación de medición experimental.....	3
2.1.3	Prueba en turbina de laboratorio.....	4
2.1.4	Búsqueda de patrones que evidencien cavitación.....	4
2.1.5	Estudio de la unidad generadora de una central hidroeléctrica.	5
2.2	Recursos	5
2.2.1	Recolector y Software analizador de vibraciones.....	5
2.2.2	Acelerómetros.....	6
2.2.3	Emisiones acústicas	6
3	Antecedentes	7
3.1	Cavitación.....	7
3.2	Turbinas Francis	9
3.2.1	Distribuidor.....	11
3.3	Análisis de vibraciones.....	12
3.4	Demodulación por Kurtosis espectral.....	16
4	Desarrollo.....	17
4.1	Pruebas preliminares	17
4.2	Pruebas en laboratorio UFSC	18
4.2.1	Descripción.....	18
4.2.1.1	Procedimiento	19
4.2.1.2	Variables monitoreadas.....	19
4.2.1.3	Condiciones de operación:	22
4.2.1.4	Test de impacto	23
4.2.2	Resultados y análisis.....	26
4.2.2.1	Apreciaciones cualitativas	26

4.2.2.2	Detalle de condiciones de ensayos	27
4.2.2.3	Test de impacto:	29
4.2.2.4	Frecuencias esperadas:	34
4.2.2.5	Aceleración global:	35
4.2.2.6	Análisis de espectros:	36
4.2.2.7	Emisiones acústicas:	40
4.2.2.8	Análisis de Kurtogramas y demodulación	42
4.2.2.9	Parámetros estadísticos	47
4.2.2.10	Empirical mode decomposition (EMD).....	49
4.2.2.11	Filtro pasa banda	51
4.2.3	Análisis y discusión	52
4.3	Prueba en Central Chiburgo	54
4.3.1	Descripción de la prueba	55
4.3.2	Resultados.....	57
4.3.2.1	Medición con acelerómetros.....	57
4.3.2.2	Emisiones acústicas	61
4.3.3	Análisis y discusión	62
5	Discusiones	64
6	Conclusiones	65
	Bibliografía.....	67
	Anexos	69
I-	Ficha técnica de acelerómetros utilizados.	69
II-	Espectro de calibración en shaker	70
III-	Espectro de prueba en bombas	70
IV-	Espectros en cascada de álabes directrices, descarga y descanso en dirección axial con marcas en frecuencias características.....	71

Lista de Figuras

Figura 2-1 Diagrama de metodología [Elaboración propia].....	3
Figura 2-2 Turbina Francis de laboratorio UTFSM	4
Figura 2-3 Recolector y analizador de datos MVX [Manual del equipo]	5
Figura 2-4 Equipo de adquisición de emisiones acústicas con su respectivo sensor.[Manual del equipo].....	6
Figura 3-1 Micro-jet formado por la implosión de una burbuja de cavitación cerca de una pared [4]	7
Figura 3-2 Diferentes tipos de cavitación presentes en una turbina Francis [8].....	8
Figura 3-3 Ejemplo de rangos de operación de una turbina[Curso de generación UFBA].....	10
Figura 3-4 Erosión en álabes de un rodete producida por cavitación [10].....	10
Figura 3-5 Triángulos de velocidades a distintos puntos de operación: plena carga a la izquierda y carga parcial a la derecha. [11].....	11
Figura 3-6 Fuentes de vibración de una turbina Francis [8].....	12
Figura 3-7 Espectro de energía acústica para diferentes valores del sigma de Thoma [14].....	12
Figura 3-8 Simulación de antorcha de cavitación a diferentes cargas [15].....	13
Figura 3-9 Ubicación de sensores para cavitación y transmisión de señales por la estructura [8]	14
Figura 3-10 Espectros en descanso (izquierda) y en álabes directrices (derecha) [17].....	15
Figura 3-11 Amplitud vibratoria en 12 puntos alrededor de la turbina [19]	15
Figura 4-1 Prueba de equipo en instalación de bombas [Elaboración propia]	17
Figura 4-2 Shaker usado para calibración [Elaboración propia]	18
Figura 4-3 Vista general de la instalación de la turbina Francis [Elaboración propia]	19
Figura 4-4 Ubicación de los acelerómetros en plano en corte de la turbina Francis [Elaboración propia].....	19
Figura 4-5 Acelerómetro instalado en la descarga de la turbina [Elaboración propia]	20
Figura 4-6 Vertedero en V para estimar caudal [Elaboración propia]	21
Figura 4-7 Acelerómetros y sensores de emisión acústica instalados para ensayos [Elaboración propia].....	22
Figura 4-8 Test de impacto en eje con sensores en descanso [Elaboración propia].....	24
Figura 4-9 Test de impacto en álabe directriz [Elaboración propia]	24
Figura 4-10 Test de impacto en carcasa [Elaboración propia]	25

Figura 4-11 Espectro en cascada en el descanso dirección radial [Elaboración propia, extraído de software]	26
Figura 4-12 Aceleración global en el descanso, dirección radial a lo largo del ensayo. [Elaboración propia].....	27
Figura 4-13 Comparación de flujo laminar (izquierda) con flujo con turbulencia y burbujas (derecha) en el visor de la descarga [Elaboración propia].....	29
Figura 4-14 Test de impacto en álabe directriz con agua, dirección tangencial [Elaboración propia, extraído de software]	29
Figura 4-15 Test de impacto en álabe directriz con agua, dirección radial [Elaboración propia].	30
Figura 4-16 Test de impacto en eje con agua, respuesta radial [Elaboración propia]	30
Figura 4-17 Test de impacto en eje con agua, respuesta axial [Elaboración propia]	31
Figura 4-18 Test de impacto en carcasa con agua. [Elaboración propia].....	31
Figura 4-19 Test de impacto en álabe directriz sin agua. [Elaboración propia]	32
Figura 4-20 Test de impacto en carcasa sin agua. [Elaboración propia]	32
Figura 4-21 Test de impacto en eje sin agua, respuesta radial. [Elaboración propia]	33
Figura 4-22 Test de impacto en eje sin agua, respuesta axial. [Elaboración propia]	33
Figura 4-23 Aceleración global en los 4 canales [Elaboración propia, extraído de software]	35
Figura 4-24 Comparación de espectros en la descarga a las 15:17 y 15:21 [Elaboración propia, extraído de software de procesamiento]	36
Figura 4-25 Superposición de espectros en dirección axial a las 15:09 y a las 15:11 [Elaboración propia].....	36
Figura 4-26 Espectro en cascada en descanso dirección radial [Elaboración propia]	37
Figura 4-27 Espectro en cascada de álabe directriz [Elaboración propia]	37
Figura 4-28 Espectro dirección Radial condición óptima de flujo [Elaboración propia, extraído de software]	38
Figura 4-29 Espectro dirección radial con caudal a 90% del nominal [Elaboración propia].....	38
Figura 4-30 Espectro en dirección radial en condición de cavitación [Elaboración propia].....	39
Figura 4-31 Espectro en álabe directriz en condición de cavitación [Elaboración propia]	39
Figura 4-32 Espectro dirección radial en condición de cavitación [Elaboración propia]	40
Figura 4-33 Forma de onda en álabe directriz a las 14:54 [Elaboración propia]	41
Figura 4-34 Espectro de emisiones acústicas en álabe directriz 14:54 [Elaboración propia]	41
Figura 4-35 Espectro de emisiones acústicas en álabe directriz 15:11 [Elaboración propia]	42

Figura 4-36 Kurtograma en condiciones de cavitación (15:27) generado por la Matlab [Elaboración propia]	43
Figura 4-37 Kurtosis en álabe directriz 15:04 [Elaboración propia]	44
Figura 4-38 Kurtosis en álabe directriz 15:08 [Elaboración propia]	44
Figura 4-39 Proceso de demodulación de la señal de las 15:27 en la descarga [Elaboración propia, extraído de software Matlab]	45
Figura 4-40 Kurtograma en álabes directrices a las 15:17 (izquierda) y alas 15:11 (derecha) [Elaboración propia]	45
Figura 4-41 Aceleración global y Kurtosis en función del tiempo para el ensayo 2.....	46
Figura 4-42 Kurtograma a las 14:54 izquierda (laminar) y 15:11 derecha (con cavitación) [Elaboración propia]	47
Figura 4-43 Detalle de aceleración global en función del tiempo en álabe directriz [Elaboración propia, extraído de software]	48
Figura 4-44 Comparación entre Aceleración global y Skewness [Elaboración propia].....	48
Figura 4-45 Comparación de formas de onda 15:24 (izquierda) y EMD de 15:24 (derecha) [Elaboración propia]	49
Figura 4-46 Descomposición de modos empíricos de la señal de las 15:24 [Elaboración propia]	50
Figura 4-47 Comparación de espectro original (izquierda) y espectro de EMD (derecha) a las 15:24 [Elaboración propia]	50
Figura 4-48 Forma de onda 15:22 [Elaboración propia]	51
Figura 4-49 Filtro pasa banda 700 a 800Hz 15:22 [Elaboración propia, extraído de software] ...	51
Figura 4-50 Filtro pasa banda 700 a 800Hz 15:22 [Elaboración propia, extraído de software] ...	52
Figura 4-51 Turbina Chiburgo1 [Elaboración propia]	54
Figura 4-52 Instalación de sensores axial y radial en descanso combinado [Elaboración propia]	55
Figura 4-53 Instalación de sensor en álabe directriz [Elaboración propia]	56
Figura 4-54 Instalación de acelerómetro y sensor de emisiones acústicas en descanso de turbina [Elaboración propia]	56
Figura 4-55 Instalación de acelerómetro en descarga de la turbina [Elaboración propia]	57
Figura 4-56 FFT descanso combinado dirección axial [Elaboración propia, extraído de software]	58
Figura 4-57 FFT descanso combinado dirección radial [Elaboración propia, extraído de software]	58
Figura 4-58 FFT Álabe directriz [Elaboración propia]	59

Figura 4-59 FFT Tubería de descarga [Elaboración propia]	59
Figura 4-60 FFT Descanso de turbina dirección radial	60
Figura 4-61 Forma de onda tubería de descarga con impactos marcados (valores amplificados x10) [Elaboración propia].....	61
Figura 4-62 Forma de onda de emisiones acústicas [Elaboración propia]	61
Figura 4-63 FFT en descanso de turbina [Elaboración propia]	62

Lista de Tablas

Tabla 3-1 Tasa de erosión de distintos materiales por cavitación	8
Tabla 3-2 Valores límites recomendados para el parámetro de Thoma en función de N_s	9
Tabla 4-1 Características turbina Francis	18
Tabla 4-2 Detalle de ensayo 1	27
Tabla 4-3 Detalle de ensayo 2	28
Tabla 4-4 Detalle de ensayo 3	28
Tabla 4-5 Frecuencias características de la turbina Francis	34
Tabla 4-6 Comparación de parámetros estadísticos para el ensayo 2	47
Tabla 4-7 Características central Chiburgo	54
Tabla 4-8 Condiciones de operación Chiburgo 1 el 26 de Enero a las 14:00.....	57
Tabla 4-9 Valores globales de aceleración en los puntos estudiados	60

1 Introducción

1.1 Antecedentes generales

En Chile alrededor del 50% de la potencia instalada de generación corresponde a turbinas hidroeléctricas [1], y a nivel mundial, hasta el año 2008 representaba más del 80% de la potencia generada por energías renovables [2]. Estas son máquinas muy interesantes para estudios de Ingeniería en muchos aspectos: estructuralmente se trata de máquinas rotativas de gran envergadura, manejan grandes masas de agua lo que las hace dinámicamente complicadas y, al generar grandes cantidades de energía las cifras económicas relacionadas a su construcción, mantención, operación y costo de falla son muy relevantes.

Lo anterior motiva estudios como este ya que toda detención de una turbina hidráulica por falla involucra pérdidas económicas muy importantes: en el caso de una unidad de 500MW, el costo a falla puede ser del orden de 4000US\$/hr. De ahí que las empresas generadoras destinan muchos recursos a su prevención.

1.2 Motivación

Al momento de diseñar una turbina hidráulica se toma en cuenta el caudal disponible y la caída en altura de este. Esto determina la potencia máxima a generar y en función de esos parámetros se diseña la central.

Sin embargo, las turbinas hidráulicas dependen de un recurso hídrico que es variable tanto en presión como en caudal y por ello su operación frecuentemente se realiza fuera de las condiciones de diseño. Lo mismo ocurre con la demanda de energía a la central. Estas variaciones hacen que las condiciones hidrodinámicas en el rotor cambien fuera de los límites recomendables para su geometría.

La operación sostenida bajo estas condiciones puede provocar graves daños a la instalación, por fenómenos como el de cavitación ya sea en descansos, álabes directrices, álabes del rotor, generador eléctrico o tubería de descarga.

1.3 Objetivo general

El objetivo general de este estudio es:

Detectar daños incipientes por cavitación durante la operación de una central para alertar oportunamente al operador permitiéndole activar mecanismos para evitarlos.

1.4 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Desarrollar un método para detectar fenómenos de cavitación u otros propios del flujo que sean dañinos para la turbina, en tiempo real.
- Establecer patrones característicos que evidencien cavitación.
- Establecer condiciones de flujo críticas para trabajar sin daños en la instalación.

1.5 Alcances

Por ser las más comunes en Chile, este estudio se limitará a turbinas Francis.

Las variables estudiadas serán solamente mecánicas, ya sea vibraciones o parámetros extraídos a partir de estas.

El estudio considera estudiar únicamente daños generados por operación fuera de condiciones de diseño, y la posibilidad de evitarlos cambiando condiciones de carga o velocidad de giro.

2 Metodología

2.1 Metodología general

Para el desarrollo de la memoria se seguirá la siguiente metodología, esquematizada en la Figura 2-1. En primera instancia se harán pruebas de calibración con los equipos utilizados, descritos en la sección 2.2, para luego realizar pruebas en la turbina Francis del laboratorio de fluidos de la UFSM en todas las condiciones de operación posibles. Luego se procesarán los datos para detectar patrones y finalmente se tomará una medida en la central Chiburgo de Colbún, para probar el modelo.

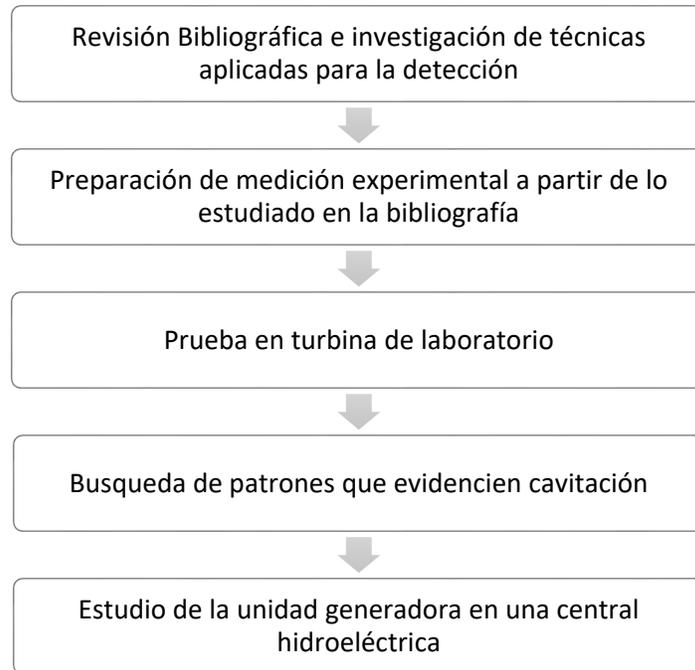


Figura 2-1 Diagrama de metodología [Elaboración propia]

A continuación se explican los pasos esquematizados:

2.1.1 Revisión bibliográfica

Se realiza un estudio del estado del arte en detección de cavitación, prestando atención en los métodos de detección para poder eventualmente replicarlos.

Se revisan artículos científicos, reportes de conferencias y libros.

Se incorpora revisión bibliográfica realizada en curso de introducción al trabajo de título mas la presentada en el la sección 3.

2.1.2 Preparación de medición experimental

En primera instancia se harán pruebas de calibración con los equipos utilizados, descritos en la sección 2.2, para asegurar la precisión en las medidas. Luego se preparará un montaje experimental acorde a lo expuesto en la bibliografía en cuanto a disposición de sensores y procesamientos a realizar, para realizar las siguientes etapas. Este comprende 4 acelerómetros en la turbina y 2 sensores de Emisiones Acústicas, además de test de impacto en 3 puntos de la turbina.

2.1.3 Prueba en turbina de laboratorio

Consiste en pruebas en instalación de turbina Francis a escala en el laboratorio de fluidos de la UTFSM en Valparaíso. En esta prueba se busca:

- Probar en terreno protocolo experimental similar a la encontrada en la bibliografía y comparar los resultados obtenidos para identificar patrones con el fin de detectar la presencia de cavitación.
- Procesar los datos usando técnicas avanzadas de análisis de vibraciones con el fin de detectar cavitación erosiva.
- Evaluar la presencia de cavitación para los diferentes rangos de operación de la turbina en la instalación del laboratorio, de manera de validar el método para usarlo posteriormente en una central hidroeléctrica.



Figura 2-2 Turbina Francis de laboratorio UTFSM

2.1.4 Búsqueda de patrones que evidencien cavitación.

Se procesarán los datos obtenidos en el punto anterior para buscar patrones con los que se pueda determinar la presencia de cavitación. Los análisis realizados son los siguientes:

- Evolución en el tiempo de la aceleración RMS
- Comparación de la aceleración en el espectro a media y alta frecuencia según las condiciones de flujo
- Estudio de la evolución de la Kurtosis y skewness de las medidas al variar el caudal y entrar en una zona de cavitación.
- Descomposición de las señales por Empirical Mode Decomposition y filtro pasa-banda para detectar impactos de burbujas en el dominio del tiempo.

A partir de ellos, en primera instancia se detecta la aparición de fenómenos de cavitación en función de las condiciones de flujo, y luego se trabaja en una forma de analizar la condición del flujo en una sola medida.

2.1.5 Estudio de la unidad generadora de una central hidroeléctrica.

La empresa Colbún permitió realizar medidas en la unidad generadora de la central Chiburgo en la VII región. Esta prueba tiene como objetivo

- Probar el modelo establecido previamente a partir de las pruebas de laboratorio en la instalación real, para determinar la condición actual de flujo de la turbina.
- Permitir mostrar las técnicas a la empresa para dar paso a una nueva memoria, en la que se monitoree la central durante un periodo de tiempo y se realice su evaluación y seguimiento en detalle.
- Determinar posibles dificultades de aplicación del protocolo experimental en una turbina real.

2.2 Recursos

2.2.1 Recolector y Software analizador de vibraciones

Se dispone del recolector MVX y su respectivo software XPR-300 de la marca OneProd. Este tiene frecuencia máxima de adquisición $f_a = 51.2kHz$.



Figura 2-3 Recolector y analizador de datos MVX [Manual del equipo]

El equipo permite según el teorema de Nyquist obtener datos con una frecuencia máxima de:

$$f_{\max} = f_a / 2.56 = 20kHz \quad (3.1)$$

hasta en 16 canales simultáneamente.

De acuerdo al teorema de Nyquist, el factor es 2, sin embargo para anular cualquier posibilidad de submuestreo en la señal o muestreo incorrecto, el fabricante establece 2.56.

Para la FFT, el equipo permite hasta 1600 líneas. Por lo tanto, si la frecuencia máxima es de 20kHz, la resolución en frecuencia es de 12.5Hz.

Como post-procesamientos disponibles en el software XPR-300 se encuentran: formas de onda, espectros, análisis de envolventes, análisis Shock Finder que permite detectar impactos,

Cepstrum, entre otros. Será utilizada principalmente la Transformada de Fourier Rápida (FFT por sus siglas en inglés).

Además se trabajará con el software Matlab® para todo lo que requiera de cálculos.

2.2.2 Acelerómetros

Se dispone de acelerómetros uniaxiales Hansford HS100, HS160 y HS100T con sensibilidades de 10, 50 y 100 mV/g. En Anexo I se presenta la ficha técnica de dichos sensores.

Estos serán fijados a la estructura por medio de bases magnéticas.

2.2.3 Emisiones acústicas

Se trabajará con un equipo del grupo Mistras para medir emisiones acústicas con sus respectivos sensores y software de procesamiento. Este tiene una frecuencia de adquisición máxima de 40MHz. Se observa junto con un sensor de emisiones acústicas en la Figura 2-4.



Figura 2-4 Equipo de adquisición de emisiones acústicas con su respectivo sensor.[Manual del equipo]

3 Antecedentes

3.1 Cavitación

La cavitación es un fenómeno hidrodinámico que se produce al disminuir la presión de un líquido bajo su presión de vapor. Cuando esto ocurre se forman pequeñas burbujas de vapor o cavidades dentro del líquido. Estas burbujas nuclean y crecen hasta estabilizarse en el líquido, después son llevadas por la corriente hasta otro punto en el cual la presión hidrostática aumenta provocando su colapso violento.

Cuando este colapso se produce cerca de una pared, como se ve en la Figura 3-1, no es simétrico y se forma aplastando a las cavidades que tienen menor presión. Este erosiona fuertemente la pared contra la cual impacta sea cual sea el material del que este compuesto. En la Tabla 3-1 se presentan tiempos de erosión de distintos materiales en presencia de cavitación.

Entre las características más representativas del fenómeno de cavitación se encuentra la dimensión de las burbujas que es de 0.25 pulgadas de diámetro, con una duración de 3 milisegundos y una velocidad de colapso de 765 pies/s, presentando pulsaciones hasta de 7000atm [3].

Para una turbina hidráulica se define *Estado de libre cavitación o cero cavitación*: Es la habilidad de una turbina de operar por un periodo de 25000 horas sin perdidas mayores a 2.27 kg del metal del rodete; y 0.91 kg sobre las partes no rotantes, y no más de 0.23 kg de perdida de metal en cualquiera área particular de 930 cm². [4]

Del borrador de estándar de la IEEE [5] se extraen los principales incentivos para evitar la cavitación: Reducción de la frecuencia necesaria de inspecciones, reducción de la frecuencia necesaria de mantenencias, reducción del tiempo de mantenencias programadas, menos paradas no programadas, disminución del desaprovechamiento del recurso hídrico, mayor generación, mayor confiabilidad y menores costos de mantención.

Como se ve en [6] la cavitación puede depender de todos los parámetros de operación de la turbina como altura de carga, velocidad del flujo y temperatura del fluido. Sus conclusiones son que los que mas influyen en la pérdida de rendimiento son altura de carga y temperatura y el caudal mayormente influye para la cavitación.

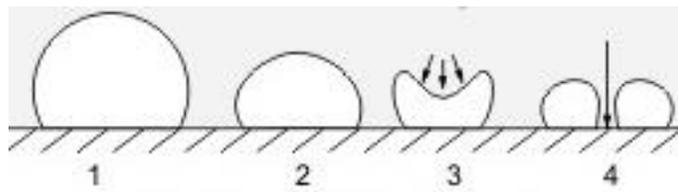


Figura 3-1 Micro-jet formado por la implosión de una burbuja de cavitación cerca de una pared [4]

Tabla 3-1 Tasa de erosión de distintos materiales por cavitación

Material	Pérdida de peso en 2hrs. [mg]
Bronce de aleación soldado	3.2
Bronce de aleación fundido	5.8
Acero inoxidable 17-7	6.0
Acero inoxidable laminado 12%C	9.0
Bronce fundido	80
Acero dulce en plancha	98
Aluminio	124
Fierro fundido	224

Fuente: Álvaro Marín, Manual de manutención mecánica. [7]

Para el presente estudio se distinguen 3 tipos principales de cavitación los cuales se muestran en la Figura 3-2:

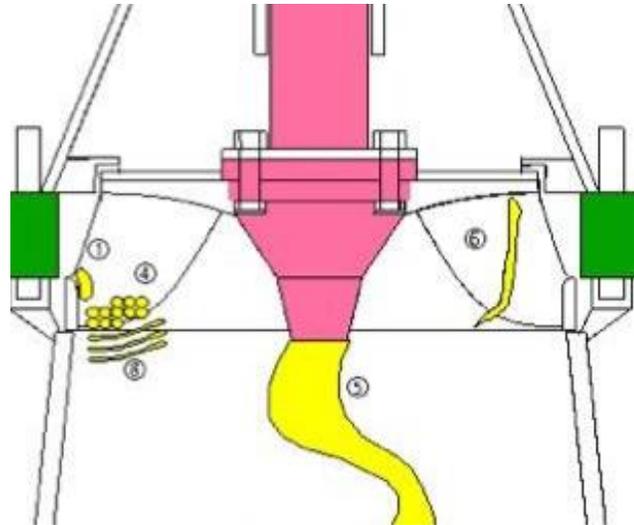


Figura 3-2 Diferentes tipos de cavitación presentes en una turbina Francis [8]

Cavitación por desprendimiento de vórtices turbulentos Cuando se tiene flujo rápido a través de un objeto, se producen turbulencias. Los vórtices no solo generan mayor roce que disminuye la eficiencia de la turbina sino que además al desprenderse provocan cavitación y van erosionando el rodete. Estas además inducen vibraciones de alta frecuencia en el rodete de la turbina.

Cavitación de antorcha por flujo La zona de menor presión de una turbina Francis corresponde a la descarga de ésta, donde ya se ha realizado toda la expansión del fluido. En esta se produce la llamada *antorcha de cavitación*, como se ve en la Figura 3-2 ítem 5. Ésta no genera erosión en los álabes sin embargo suele originar vibraciones pulsantes de baja frecuencia en el rodete que pueden desencadenar en daños a los descansos.

Parámetro de Thoma: Se define el parámetro de Thoma mediante el cual se evalúa la posibilidad de cavitación de una instalación.

$$\sigma = \frac{\frac{p_{amb} - p_s}{\rho g} - H_s}{H} \quad (3.1)$$

Donde H_s corresponde a la altura desde la salida del rodete a l nivel de agua de descarga y p_s a la presión de saturación de vapor del agua a esa temperatura.

Cuanto menor es el valor de σ , menor posibilidad de cavitación hay. La Tabla 3-2 Muestra valores recomendados para diferentes turbinas Francis y Kaplan.

Tabla 3-2 Valores límites recomendados para el parámetro de Thoma en función de N_s

Parámetros	Turbinas Francis					Turbinas de Hélice		
N_s	20	40	60	80	100	100	150	200
σ_c	0.025	0.10	0.23	0.40	0.64	0.43	0.73	1.5

Fuente: **Mataix, Claudio.** *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* [9]

A este nivel la cavitación puede no ocurrir, estar limitada o extendida lo cual no reduce la eficiencia, ni causa vibraciones o flujos inestables.

3.2 Turbinas Francis

Las turbinas Francis son turbomáquinas de reacción, eso quiere decir que el fluido al pasar por el rodete experimenta una baja de presión, ya que esta es convertida a energía cinética. Esta baja de presión puede generar el fenómeno de cavitación en los álabes, o en la descarga del rodete que corresponde a la zona de menor presión de la turbina.

Las turbinas tienen un punto de diseño en que su rendimiento es alto y se maximiza la vida útil como se ve en la Figura 3-3. Al operar fuera de ese rango se suele producir cavitación.

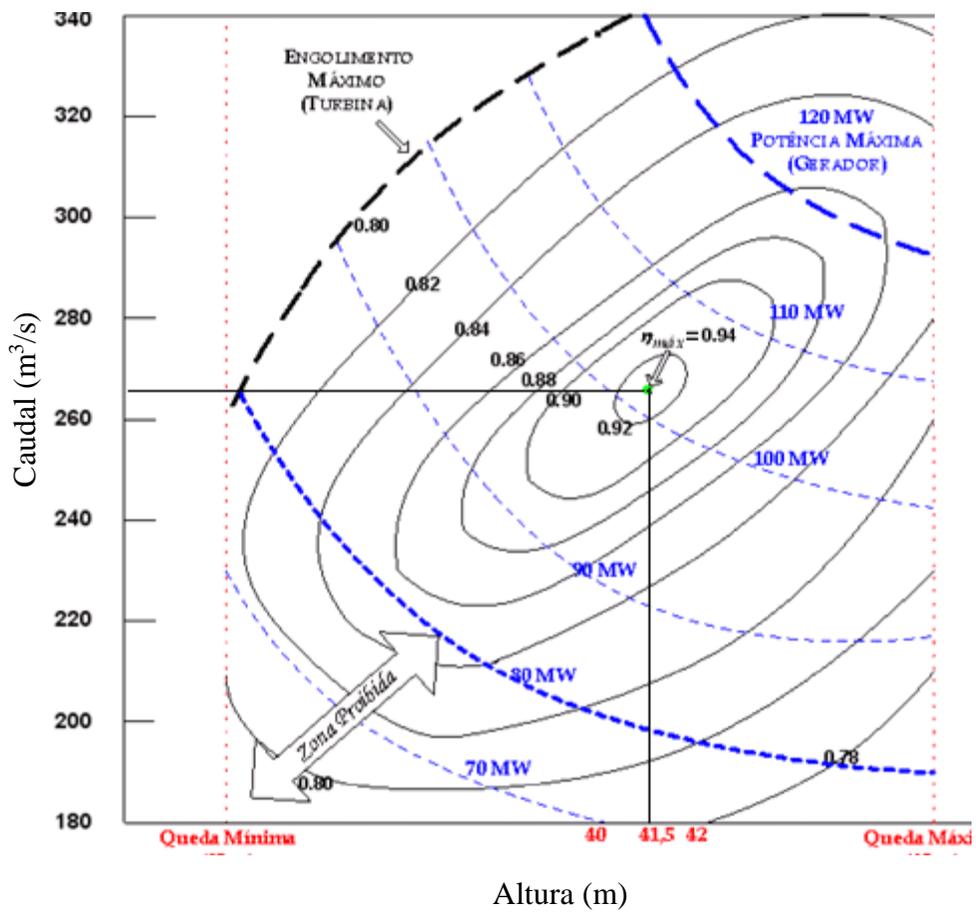


Figura 3-3 Ejemplo de rangos de operación de una turbina [Curso de generación UFBA¹]



Figura 3-4 Erosión en álabes de un rodete producida por cavitación [10]

¹ Disponible en <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA57AAE/geracao-energia-via-hidreletrica?part=4>

La cavitación es una preocupación mayor en las grandes centrales. En cada parada de planta se hacen reparaciones en el rotor para rellenar grietas o reponer material erosionado como se ve en la Figura 3-4. Estas son muy delicadas ya que la integridad estructural del rodete depende de ello, además cualquier desbalance proveniente de una reparación puede causar falla en los descansos, sellos o álabes directrices de la turbina.

3.2.1 Distribuidor.

El distribuidor de la turbina es el encargado de regular la cantidad y dirección del flujo que ingresa al rodete. Para ello dispone de álabes directrices dispuestos en la entrada del rodete. Estos permiten como se observa en la Figura 3-5 modificar la cinemática dentro de la turbina. Esto genera vórtices y puede conducir a condición de cavitación. Aquí se observa el ejemplo de la velocidad del fluido relativa al álabe w cambia de dirección en función del tipo de flujo.

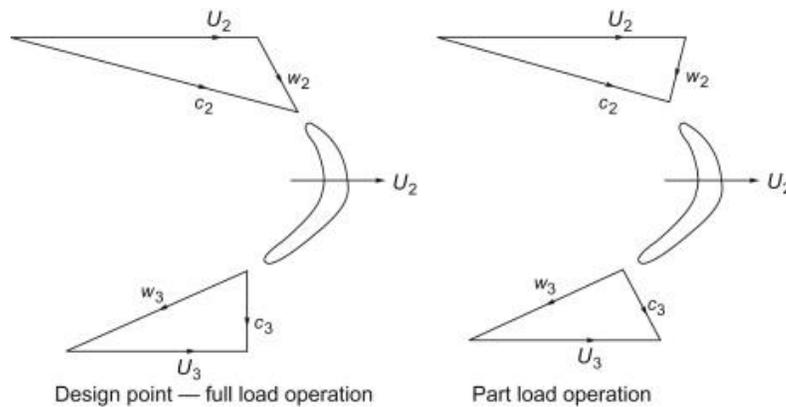


Figura 3-5 Triángulos de velocidades a distintos puntos de operación: plena carga a la izquierda y carga parcial a la derecha. [11]

En el estudio [12], los autores muestran que la componente tangencial del flujo de entrada, que viene determinada en gran parte por la apertura de los álabes del distribuidor, influye fuertemente en el flujo de salida de la turbina por el cono difusor y a su vez en la eficiencia de la unidad.

En el artículo [13] los autores realizan un amplio estudio que combina simulaciones CFD validadas con una turbina de laboratorio para estudiar los efectos de temperatura, altura de salida y velocidad del flujo sobre la cavitación. Su resultado principal es la ecuación (3.2) que expresa la pérdida de eficiencia por cavitación como:

$$\eta_{loss_cav} = 1.4550 \cdot T^{0.2247} \cdot H_s^{0.1724} \cdot V^{-5.1779} e^{3.249 \cdot \ln V} \quad (3.2)$$

Con T temperatura en $^{\circ}\text{C}$, H_s altura de succión en m, y V velocidad del flujo en m/s.

De ahí se destaca que por varios ordenes de magnitud la velocidad del flujo es el parámetro más importante, de este resultado desprendemos que el caudal que procesa la turbina es determinante en este respecto.

3.3 Análisis de vibraciones

Dentro de una turbina Francis se encuentran las fuentes de vibración que se ilustran en la Figura 3-6, estas son:

- Descansos hidrodinámicos de turbina, del generador eléctrico y descanso axial.

Se pueden generar excitaciones por defectos en los mismos descansos o bien detectar midiendo ahí anomalías de funcionamiento de la turbina

- Excitaciones producidas por el generador ya sea en el rotor o en el estator.
- Ruido producido por la cavitación en el rotor.

En la Figura 3-7 Se observa que a medida que la cavitación aumenta (mayor sigma de Thoma), a frecuencias superiores a 5kHz el ruido comienza a incrementare notoriamente. Este es un indicador a tomar en cuenta para detectar la cavitación.

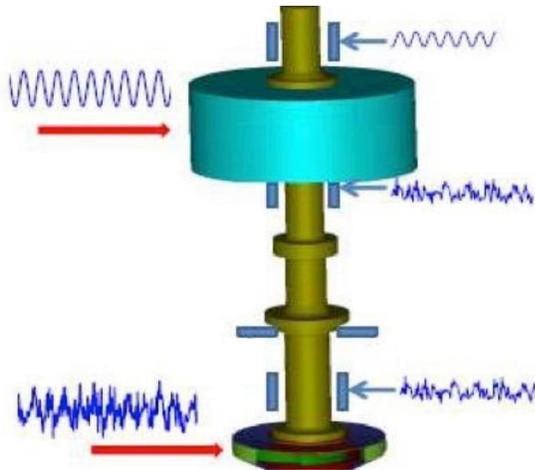


Figura 3-6 Fuentes de vibración de una turbina Francis [8]

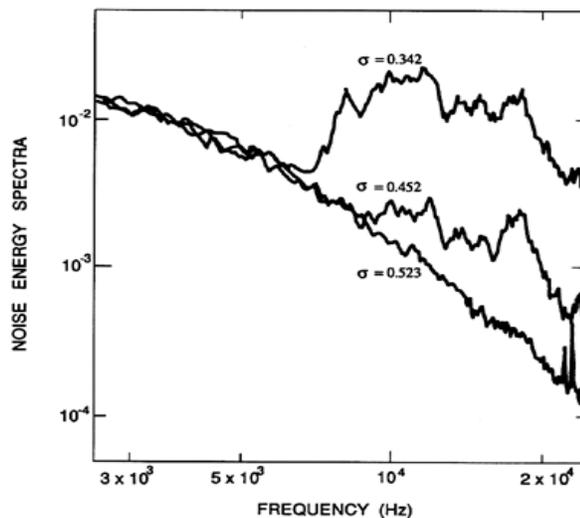


Figura 3-7 Espectro de energía acústica para diferentes valores del sigma de Thoma [14]

Como se mencionó en la sección 3.1, una condición de cavitación puede provocar diferentes tipos de excitaciones en una turbina. Además, como se estudia en [15] existen otras fuentes de vibración como la interacción entre las compuertas del distribuidor (estáticas) con el paso de los álabes del rotor. La frecuencia de estas excitaciones es la frecuencia de paso de álabes por cada compuerta guía del distribuidor que se calcula siguiendo la ecuación (3.3).

$$f_{\text{paso}} = n_{\text{álabes}} \cdot n_{\text{directrices}} \cdot f_{\text{giro}} \quad (3.3)$$

En que $n_{\text{álabes}}$ es el número de álabes de la turbina, $n_{\text{directrices}}$ la cantidad de directrices del distribuidor de la turbina y f_{giro} la frecuencia de giro en RPM de ésta.

Esta frecuencia resulta ser un orden de magnitud superior a la de rotación, lo que podría modular la señal. La amplitud es fuertemente dependiente de la distancia que hay entre rotor y estator, esta distancia también condiciona fuertemente el rendimiento volumétrico de la turbina y por ello es un punto delicado dentro de la instalación.

Sin embargo, los autores distinguen como la más problemática la turbulencia de antorcha en la descarga, que se produce de acuerdo a sus simulaciones, con carga entre 50 y 85% del óptimo. La vibración inducida por esta puede hacer resonar la instalación o sus descansos y causar graves problemas. En la Figura 3-8 se puede ver la simulación de la turbina realizada por los autores a diferentes estados de carga donde se distingue una antorcha no definida en carga mínima (a) una compacta en carga total (d) y las más problemáticas en condiciones intermedias (b) y (c).

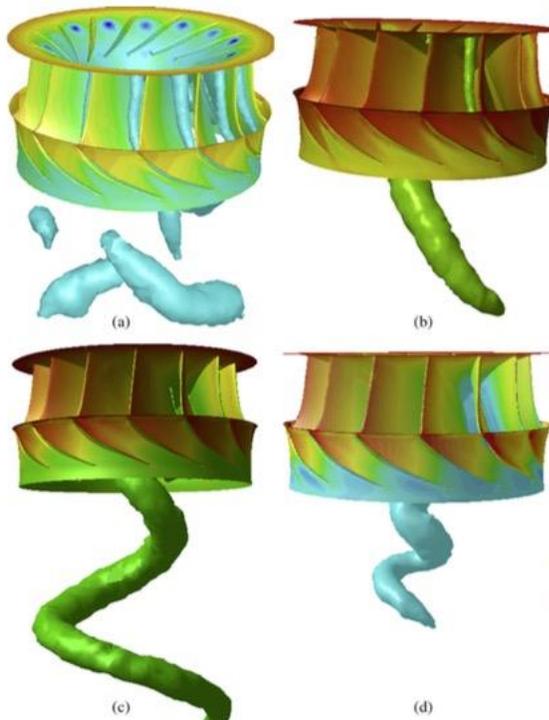


Figura 3-8 Simulación de antorcha de cavitación a diferentes cargas [15]

En [16], los autores desarrollan un método de simulación de la cavitación entre álabes para estudiar las inestabilidades producidas por esta. Se trata de un modelo matemático realizado luego de que una turbina tuviese que parar para reparar fisuras y daños en el distribuidor después de solo 6 meses de operación.

En [8] el autor presenta un protocolo experimental para detectar patrones de cavitación en una turbina hidroeléctrica, en la Figura 3-9 se observa un esquema de la instalación. Este modelo permite distinguir diferentes tipos de cavitación a partir de varios patrones. En el artículo [17] del mismo autor se realiza un análisis que permite evaluar como se transmiten las vibraciones y ruidos producidos por eventos de cavitación dentro de la unidad y relacionarlo con la erosión de los álabes. De este estudio se desprende que la amplitud de vibración es mayor en los descansos que en el eje, ya que estos últimos aportan con ruido en las mediciones. De ahí se desprende que para evaluar erosión se requiere analizar muy precisamente cualquier medición o bien medir directamente en el eje de la turbina. En ambos estudios se utiliza la técnica de demodulación de señales o análisis de envolventes, por lo que se concluye que esta será necesaria en los análisis a realizar. El trabajo [18] es un estudio de los mismos autores de [8] en que realizan mediciones y sus posteriores procesamientos en una turbina a escala real con distintas condiciones de carga.

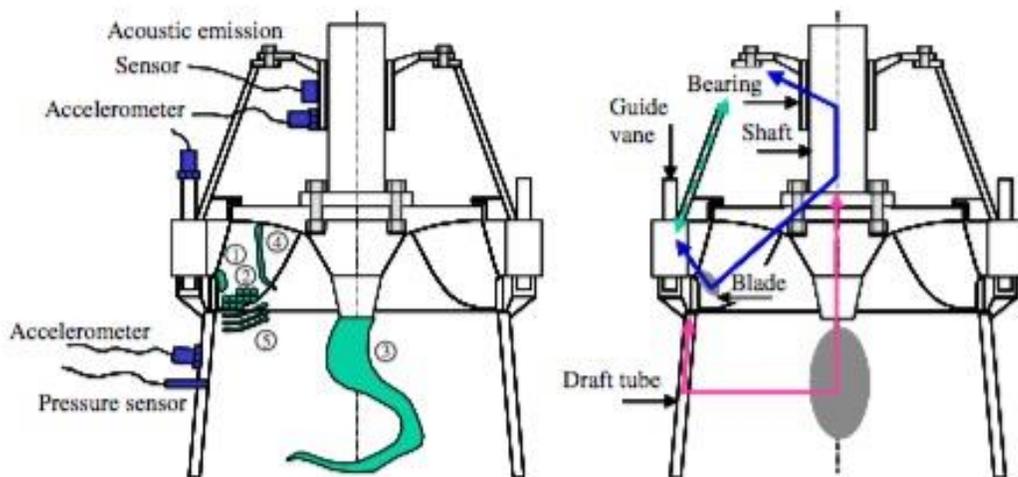


Figura 3-9 Ubicación de sensores para cavitación y transmisión de señales por la estructura [8]

También en [17], los autores comparan resultados al tomar datos directamente en el rodete de la turbina, con sensores inalámbricos contra el método tradicional de adquisición en la carcasa o los descansos. Esto para estudiar la transmisión de las señales por la estructura con la máquina operando y no solo mediante tests de impacto sin agua. Concluye que la medición en el eje presenta menos ruido y puede ser provechosa para detectar cavitación, sin embargo, no es absolutamente necesaria. La Figura 3-10 presenta comparación de mediciones en la carcasa vs los álabes directrices en función de la potencia a diferentes condiciones de carga, dentro de las cuales se produce cavitación.

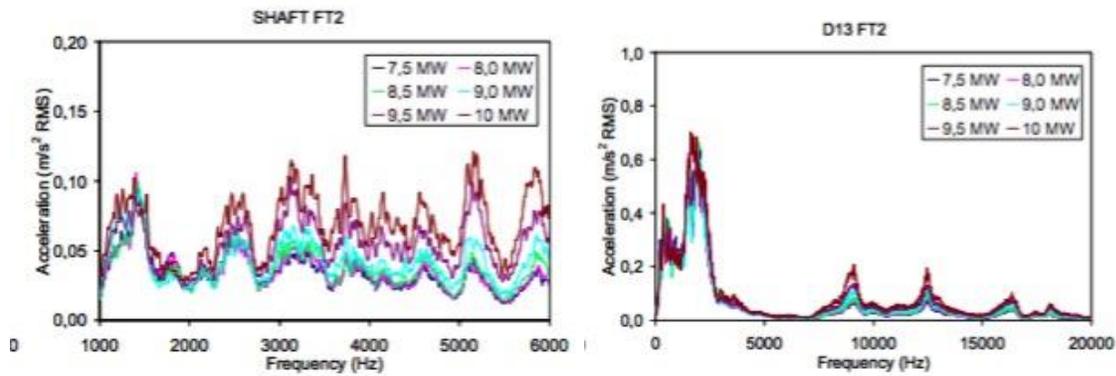


Figura 3-10 Espectros en descanso (izquierda) y en álabes directrices (derecha) [17]

En el artículo [19] se muestra un método avanzado considerando medición en distintas direcciones alrededor de la turbina, permite llegar a resultados avanzados sobre mecanismos responsables de la cavitación. Los diagramas como el presentado en la Figura 3-11 se obtienen tomando datos en 12 posiciones radiales de la turbina y permiten determinar por ejemplo cuáles álabes directrices son responsables de cavitación. Este estudio está hecho en una combinación de sensores de emisión acústica con acelerómetros. La conclusión más importante es que los resultados están fuertemente influenciados por la posición radial que se elige dentro de la instalación. De acuerdo a los autores es importante tomar promedios con datos tomados a distintas posiciones.

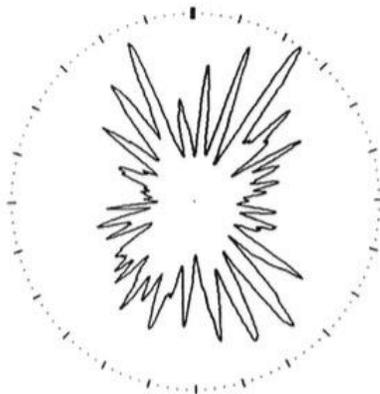


Figura 3-11 Amplitud vibratoria en 12 puntos alrededor de la turbina [19]

Finalmente, se tiene la memoria de título [20] en que se realiza un estudio de vibraciones en una turbina a pequeña escala. Ahí se describe un protocolo experimental y particularidades del trabajo en turbina.

3.4 Demodulación por Kurtosis espectral

En el artículo [21] se describe la aplicación de la Kurtosis espectral para detección de fallas en rodamientos. Para hacer una demodulación que permita detectar señales impulsivas que contienen series cortas de impactos transcientes, es necesario escoger una banda del espectro para aplicar la transformada de Hilbert. En este artículo los autores justifican el uso de Kurtosis espectral para escoger dicha banda, en vez de comparar el espectro con el de un rodamiento sano. Esto ya que permite seleccionar la parte más impulsiva de la señal y disminuir el ruido de fondo para detectar impactos que de lo contrario estarían ocultos en el.

4 Desarrollo

En esta sección se presenta el desarrollo del trabajo, comenzando por pruebas de calibración de los equipos, luego pruebas en laboratorio de turbomáquinas de la UFSM, procesamiento de esos datos y finalmente pruebas en la central Chiburgo de Colbún.

4.1 Pruebas preliminares

Con el objetivo de asegurar el correcto funcionamiento de los equipos de adquisición utilizados, se realizaron pruebas de calibración en shaker en el laboratorio de investigación en vibraciones de la FCFM (Figura 4-2) para validar los sensores y el equipo de medición. El shaker vibra a una frecuencia predefinida con una onda pura, esta se mide con los sensores y se compara con la frecuencia introducida manualmente. En Anexo II se observa el espectro con un único peak a la frecuencia impuesta por el shaker.

Además se hicieron pruebas midiendo formas de onda y FFT en distintos puntos de bombas centrífugas durante su operación, como se ve en la Figura 4-1.

Ambas fueron exitosas, en Anexos II- y III- se pueden ver parte de los resultados.



Figura 4-1 Prueba de equipo en instalación de bombas [Elaboración propia]

En el Anexo II- se observa un espectro en frecuencia de la bomba centrífuga usada como prueba. En la turbina se espera encontrar un comportamiento similar: una componente a $1x$ de la velocidad de giro y una componente a la frecuencia de paso de álabes. En este caso el espectro solo alcanza los 5kHz, sin embargo se aprecia una excitación de banda ancha en la zona donde están los cursores 3, 4 y 5 que podría corresponder a algún fenómeno hidráulico como cavitación o turbulencias. Se requeriría más estudio para corroborarlo pero no era el objetivo de dicha prueba.



Figura 4-2 Shaker usado para calibración [Elaboración propia]

Se observan en el espectro del Anexo II-, las frecuencias características de la bomba: 1x y 2x velocidad de giro en cursores C1 y C2 y frecuencias de paso de álabes en C4.

4.2 Pruebas en laboratorio UFSM

4.2.1 Descripción

El día 14 de Diciembre de 2016 se realizó una prueba en la turbina Francis del laboratorio de turbomáquinas de la Universidad Federico Santa María en Viña del Mar.

Las características de esta turbina, que se puede observar en la Figura 4-3, se presentan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Características turbina Francis

Número de álabes del rotor	15
Número de álabes directrices	10
Velocidad de giro	450[RPM]
Caudal nominal	0.2[lts/s]
Potencia nominal	7[kW]
Altura nominal de carga	4.64[mCA]

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-3 se observa una vista general de la turbina, que se ampliará posteriormente en las Figura 4-5 y Figura 4-7.

4.2.1.1 Procedimiento

Luego del reconocimiento de la instalación se procedió a instalar los sensores. Se dispusieron 4 acelerómetros como se observa en la Figura 4-4: Dos en el descanso de la turbina (en direcciones radial y axial), uno en un álabe directriz de la corona (Figura 4-7) y uno en la tubería de descarga (Figura 4-5). A partir de esta configuración, como se vio en [8], se podrían detectar los 3 tipos de cavitación principales (álabe directriz, álabe de turbina y tubería de descarga).

En los párrafos siguientes se detallan las pruebas realizadas y variables monitoreadas.



Figura 4-3 Vista general de la instalación de la turbina Francis [Elaboración propia]

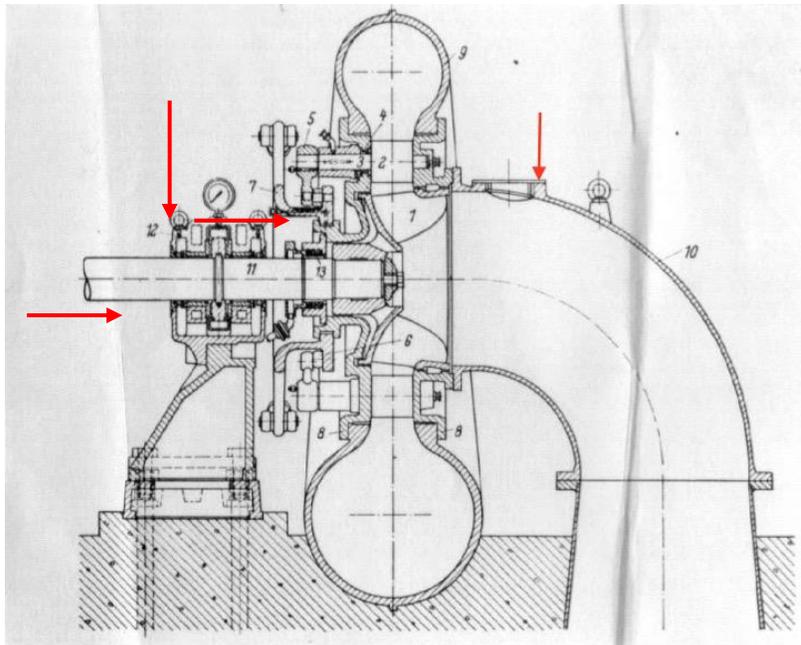


Figura 4-4 Ubicación de los acelerómetros en plano en corte de la turbina Francis [Elaboración propia]

4.2.1.2 Variables monitoreadas

Con los acelerómetros se monitorearon los siguientes parámetros en cada punto:

- Forma de onda con frecuencias de muestreo: 12.8kHz, 25.6kHz y 51.2kHz. 8192ptos.
- FFT de 10Hz a 20kHz de 1600 líneas.

Además se midió con el equipo de emisiones acústicas, y dos sensores que fueron instalados en el descanso y en un álabe directriz, en la Figura 4-7 se observa la instalación de este último. Este equipo muestreó a una frecuencia de 10MHz, de ahí se obtuvieron las respectivas formas de onda y FFT hasta 5MHz.

En la instalación el freno mecánico permite medir el torque ejercido por la turbina sobre este, existe un tacómetro análogo que indica la RPM de giro y un vertedero en V (Figura 4-6) permite conocer una aproximación del caudal de descarga mediante la ecuación (4.1).

$$Q = 1.7 \cdot H^{2.5} \quad (4.1)$$

Donde H representa la altura del nivel máximo de agua dentro del vertedero en metros, y Q el caudal de descarga en m³/s.

Además en la descarga de la turbina (Figura 4-5) existe un visor que permite determinar si el flujo a la salida de ésta es laminar o presenta perturbaciones como una antorcha de cavitación.

Esto será utilizado como primera referencia para determinar si existe cavitación y establecer patrones en los resultados obtenidos.



Figura 4-5 Acelerómetro instalado en la descarga de la turbina [Elaboración propia]



Figura 4-6 Vertedero en V para estimar caudal [Elaboración propia]

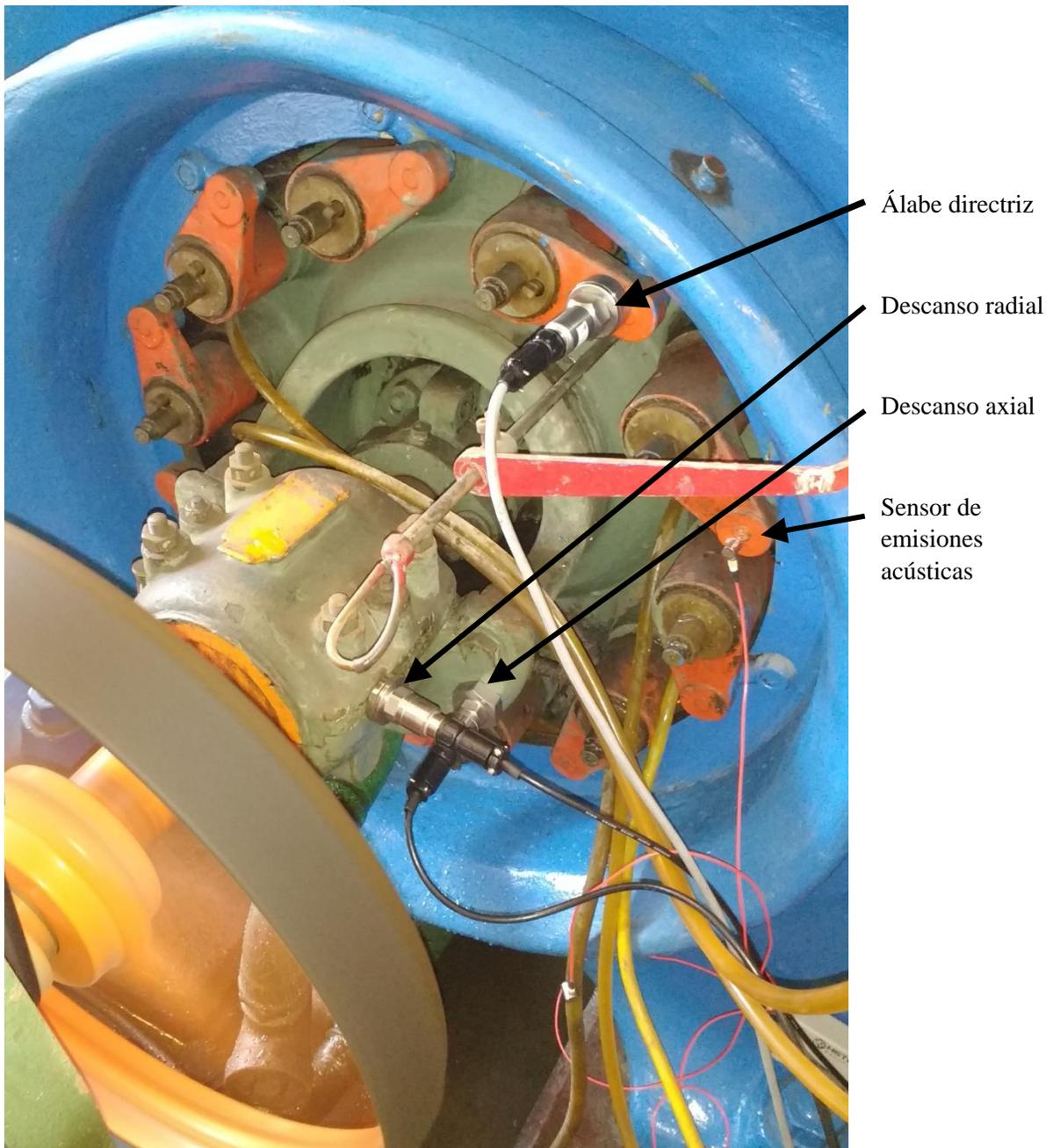


Figura 4-7 Acelerómetros y sensores de emisión acústica instalados para ensayos [Elaboración propia]

4.2.1.3 Condiciones de operación:

La turbina se encuentra acoplada a un freno mecánico, lo que permite variar la carga. El caudal de entrada se controla actuando sobre los álabes directrices.

Para realizar pruebas, con una bomba de alimentación se mantiene una altura fija de 4.67[m] en una piscina controlada por rebalse.

Se hicieron tres pruebas para evaluar cavitación a distintas condiciones:

1. Prueba con álabes directrices totalmente abiertos (caudal máximo) variando la carga de manera de variar las RPM entre el máximo posible (660RPM) y el mínimo posible (150RPM).
2. Prueba manteniendo la RPM constante en el punto de mayor eficiencia (300RPM) para simular condiciones en que se opera una turbina real, variando la apertura de los álabes directrices entre 100% y 20% donde ya no se puede mantener el giro.
3. Prueba con apertura de álabes en 50% (simulando una menor disponibilidad de recurso hídrico) y variando la carga para evaluar si un cambio de RPM mejora la operación. Finalmente se repite la misma prueba a 40% de apertura de álabes.

Dado que la medición de caudal no era lo más relevante de la prueba y no se tenían datos exactos, solo se registró la altura máxima en el vertedero de 380mm y 300mm con 30% de apertura de álabes. A partir de la ecuación (4.1) se obtiene el caudal máximo en $0.151[\text{m}^3/\text{s}]$ y el mínimo cercano a $0.0838[\text{m}^3/\text{s}]$.

4.2.1.4 Test de impacto

Una vez terminado el ensayo se procedió a detener la turbina para realizar test de impacto en distintos puntos de ella, con el fin de obtener las frecuencias de resonancia de distintas partes de la instalación. El test consiste en golpear con un martillo la instalación (excitar frecuencias naturales) y observar su respuesta en frecuencia en diferentes puntos.

Éste se repitió de igual manera con la turbina llena de agua y con la turbina drenada, de manera de cuantificar las diferencias que produzca la masa de agua. Los ensayos se realizaron en 3 puntos:

- Sensores en descanso de la turbina, golpeando el eje para detectar resonancias del rodete (Figura 4-8).
- Sensores en álabe directriz para detectar frecuencias de resonancia de este (Figura 4-9).
- Carcasa de la turbina para determinar frecuencias características de la instalación (Figura 4-10).

En la sección 4.2.2 se presentan los resultados de estos test como espectros en frecuencia comparando el impulso leído en el martillo con la respuesta detectada por los sensores.

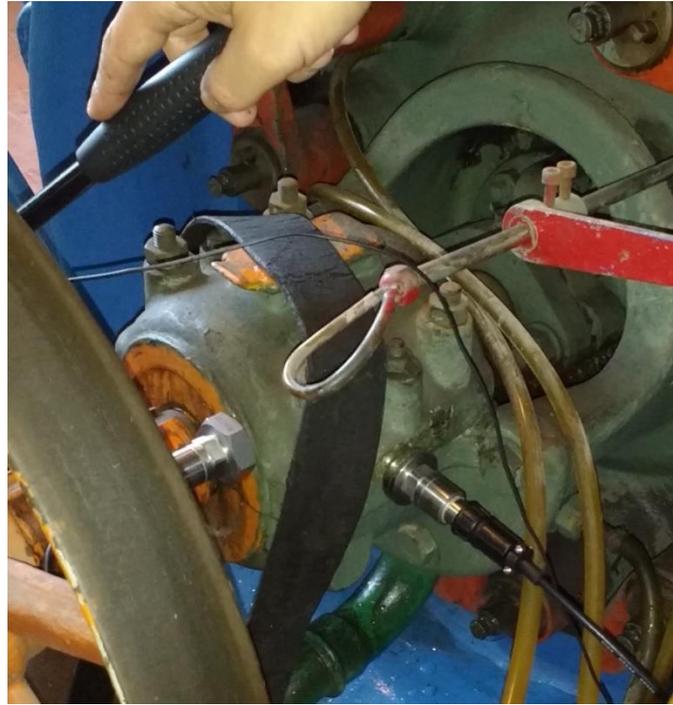


Figura 4-8 Test de impacto en eje con sensores en descanso [Elaboración propia]



Figura 4-9 Test de impacto en álabe directriz [Elaboración propia]

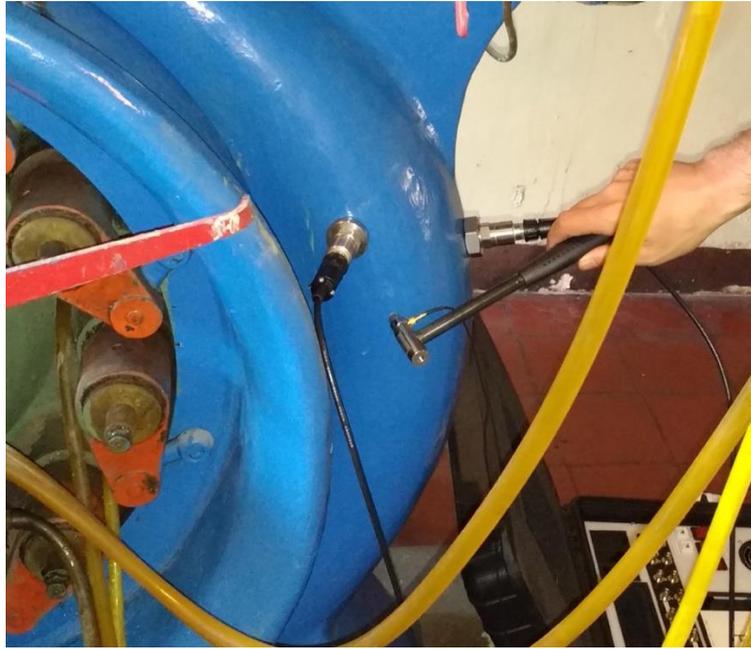


Figura 4-10 Test de impacto en carcasa [Elaboración propia]

4.2.2 Resultados y análisis

4.2.2.1 Apreciaciones cualitativas

Una primera apreciación durante la toma de datos observando el visor de la descarga (Figura 4-13) es que existe cierta inestabilidad de flujo en todo momento salvo en los puntos de mayor rendimiento (marcados con * en las Tablas 4-2 a 4-4), y mas notoria en ciertos rangos. Esto también se puede confirmar en ciertas circunstancias en que se escucha inestabilidad de flujo en la turbina. Además por el sello del eje, que no es totalmente estanco, se percibe succión de aire intermitentemente. Esto que confirma un flujo inestable dentro de la turbina. El resumen de las pruebas se presenta en la Tabla 4-2, Tabla 4-3 y Tabla 4-4.

Una observación del espectro superpuesto en cascada de toda la prueba (Figura 4-11) muestra patrones visibles en determinados instantes, lo que ya da un indicio de cómo caracterizar episodios de inestabilidad de flujo o cavitación. En Anexo IV- se observan los espectros en cascada en el resto de los puntos donde se han marcado frecuencias características.

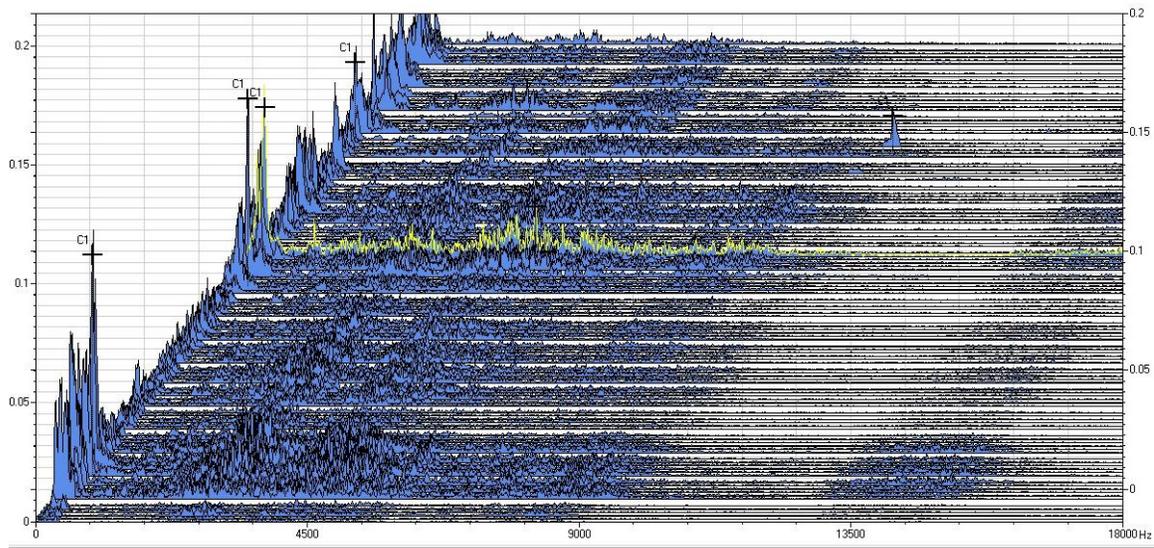


Figura 4-11 Espectro en cascada en el descanso dirección radial [Elaboración propia, extraído de software]

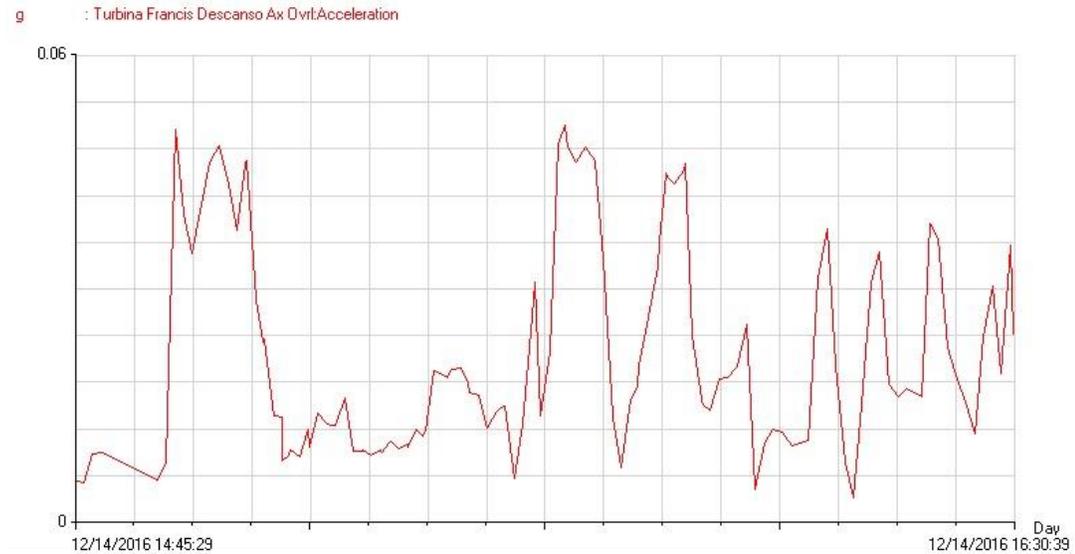


Figura 4-12 Aceleración global en el descanso, dirección radial a lo largo del ensayo. [Elaboración propia]

También se observa en el gráfico de la Figura 4-12 que el valor global de aceleración fluctúa notoriamente durante la prueba. Esto se intentará correlacionar con los episodios de cavitación.

El espectro de la Figura 4-11 y el gráfico de aceleración de la Figura 4-12 contienen todas las mediciones tomadas por el equipo automáticamente cada 1 min, por eso es necesario separar los datos que representan una condición de carga conocida que son las que están detalladas en las tablas 4-2 a 4-4.

4.2.2.2 Detalle de condiciones de ensayos

A continuación se detallan las condiciones operacionales de cada ensayo en función del tiempo, así como el tipo de flujo que se observaba en la descarga.

Tabla 4-2 Detalle de ensayo 1

Hora	RPM	Carga de fuerza	Flujo en la descarga
14.54	280	19	Laminar
14.58	660	0	Mínima cavitación
15.04	600	4.6	Pequeñas perturbaciones
15.06	500	11.1	Pequeñas perturbaciones
15.08	400	16.5	Laminar *
15.09	300	22	Laminar *
15.11	200	23	Poca cavitación
15.14	150	24	Vórtice invertido al giro de la turbina y alta inestabilidad

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-3 Detalle de ensayo 2

Hora	Apertura de álabe	Carga de fuerza	Observación
15.17	100%	22	flujo laminar *
15.19	90%	19	flujo laminar *
15.21	80%	17	pequeñas perturbaciones
15.22	70%	16.8	cavitación visible
15.24	60%	14	cavitación visible
15.27	50%	10	cavitación muy notoria
15.29	40%	7.5	cavitación muy notoria en la descarga
15.30	30%	4.5	flujo torbellino
15.33	20%	0.8	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-4 Detalle de ensayo 3

Hora	Apertura de álabe	RPM	Observación
15.35	50%	300	
15.39		500	Vórtice rápido
15.37		250	Pequeñas turbulencias
15.47	40%	250	Burbujas aisladas
15.49		350	Gran cantidad de burbujas y cavitación
15.50		400	disminuye nivel
15.52		450	Se mantiene respecto al anterior
15.53		500	Punto crítico, a mayor rpm empeora
15.55		220	Pequeñas turbulencias

Fuente: Elaboración propia

*: condiciones óptimas de flujo y máximo rendimiento de la instalación.

Para el ensayo 2 se eligió 300 RPM ya que a partir del ensayo 1 y de datos anteriores que se encontraban disponibles en el laboratorio, es la velocidad de giro a la que la turbina presenta el mayor rendimiento, estabilidad de funcionamiento y el flujo a la descarga se ve laminar.

En la Figura 4-13 se observa la tubería de la descarga a las 15:17 a la izquierda y a las 15:27 a la derecha.



Figura 4-13 Comparación de flujo laminar (izquierda) con flujo con turbulencia y burbujas (derecha) en el visor de la descarga [Elaboración propia]

4.2.2.3 Test de impacto:

Siguiendo el protocolo descrito en la sección 4.2.1.4 se obtienen los siguientes resultados:

En todas las figuras se ve en el gráfico superior el impulso del martillo y en el gráfico inferior la respuesta observada en el sensor.

Se separan por punto de medición (Figura 4-8 a Figura 4-10) y con o sin agua. En test en el eje se tiene la respuesta en dos direcciones

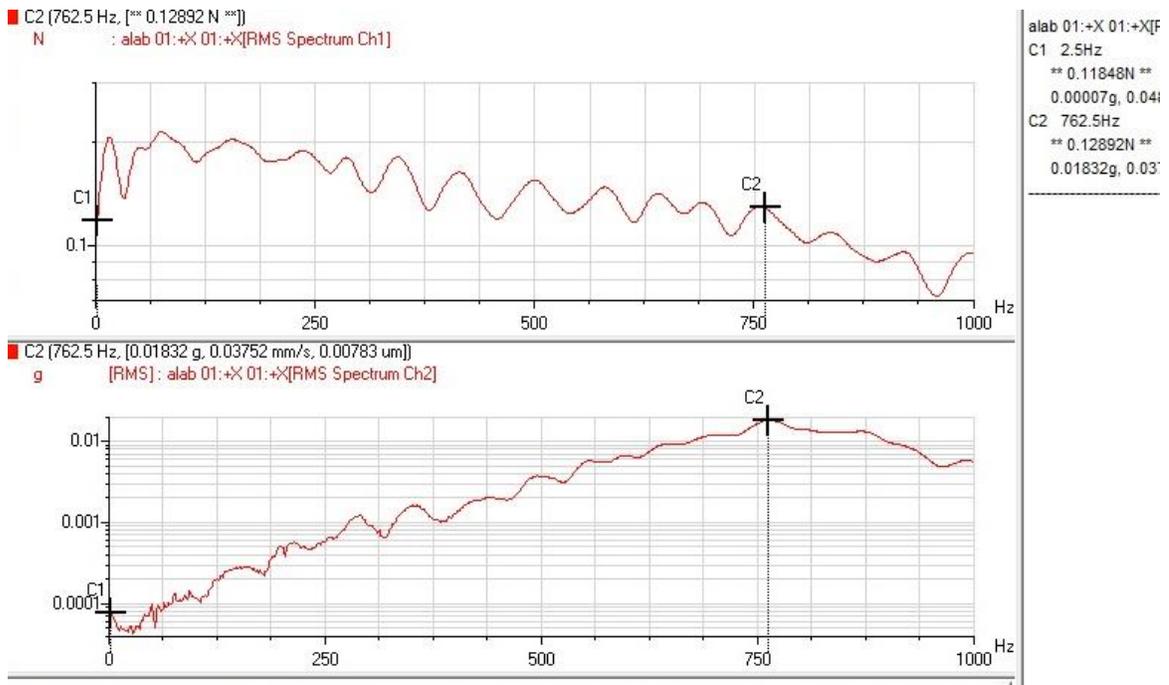


Figura 4-14 Test de impacto en álabo directriz con agua, dirección tangencial [Elaboración propia, extraído de software]

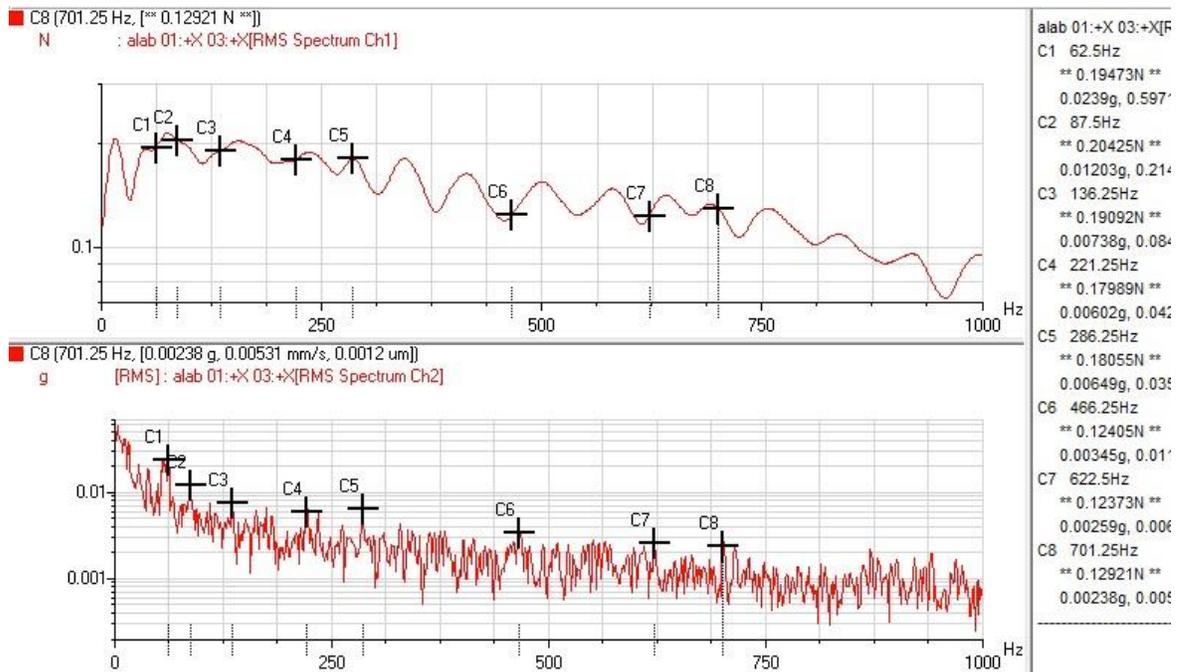


Figura 4-15 Test de impacto en álabе directriz con agua, dirección radial [Elaboración propia]

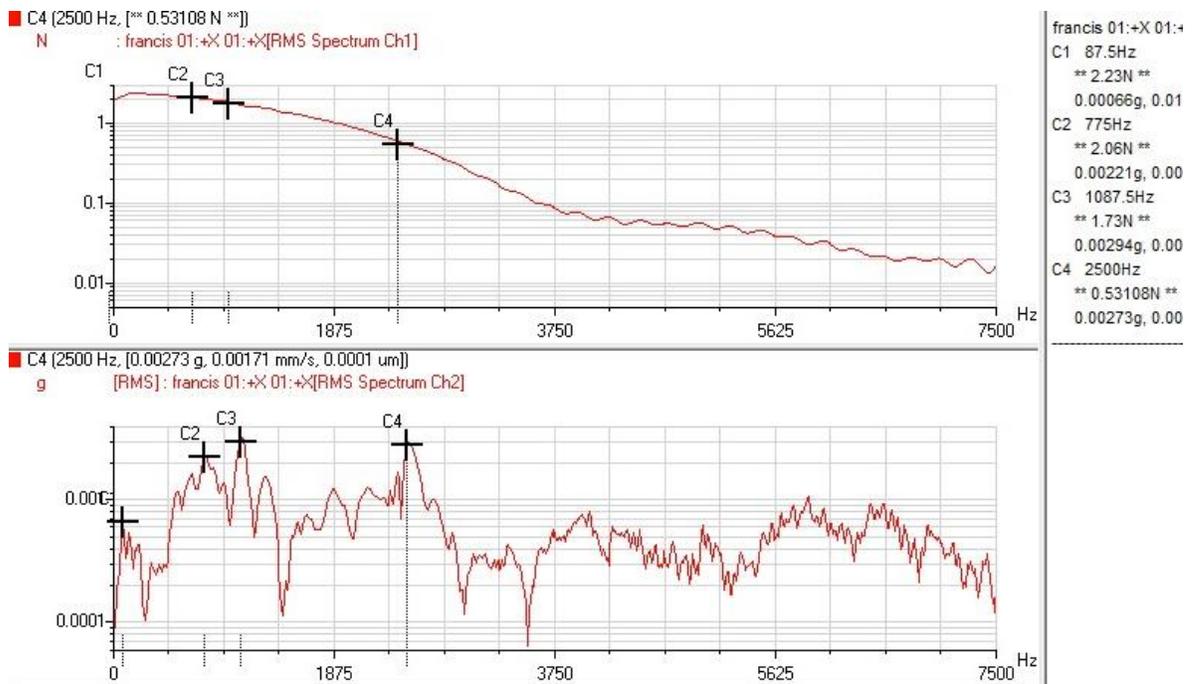


Figura 4-16 Test de impacto en eje con agua, respuesta radial [Elaboración propia]

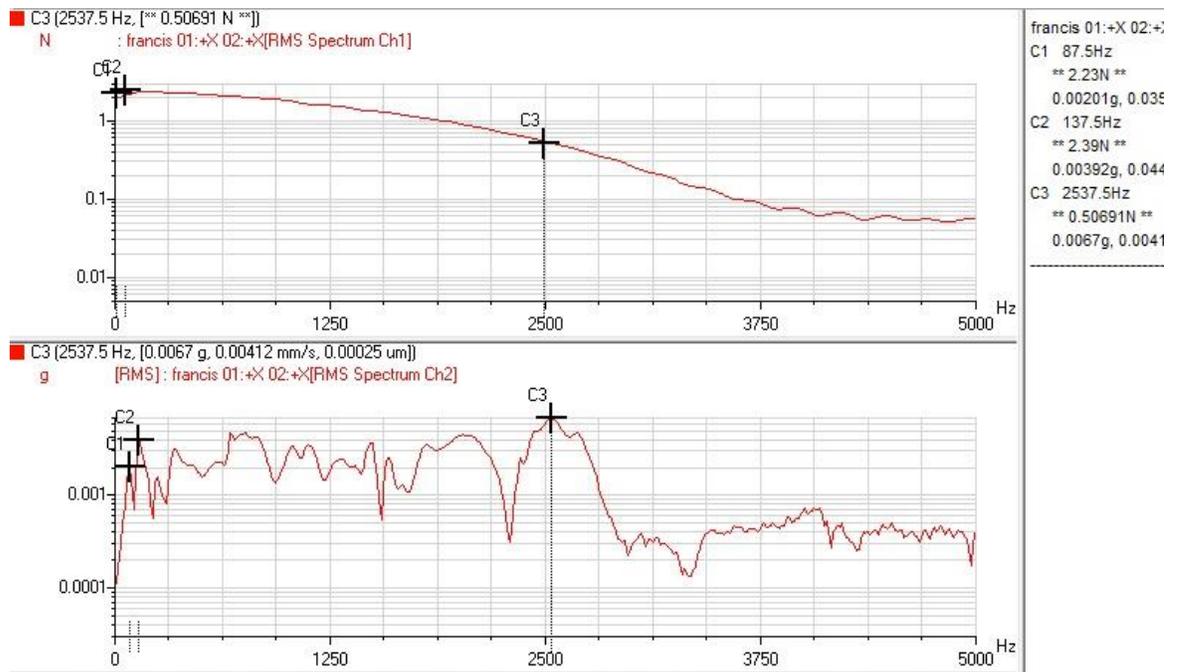


Figura 4-17 Test de impacto en eje con agua, respuesta axial [Elaboración propia]

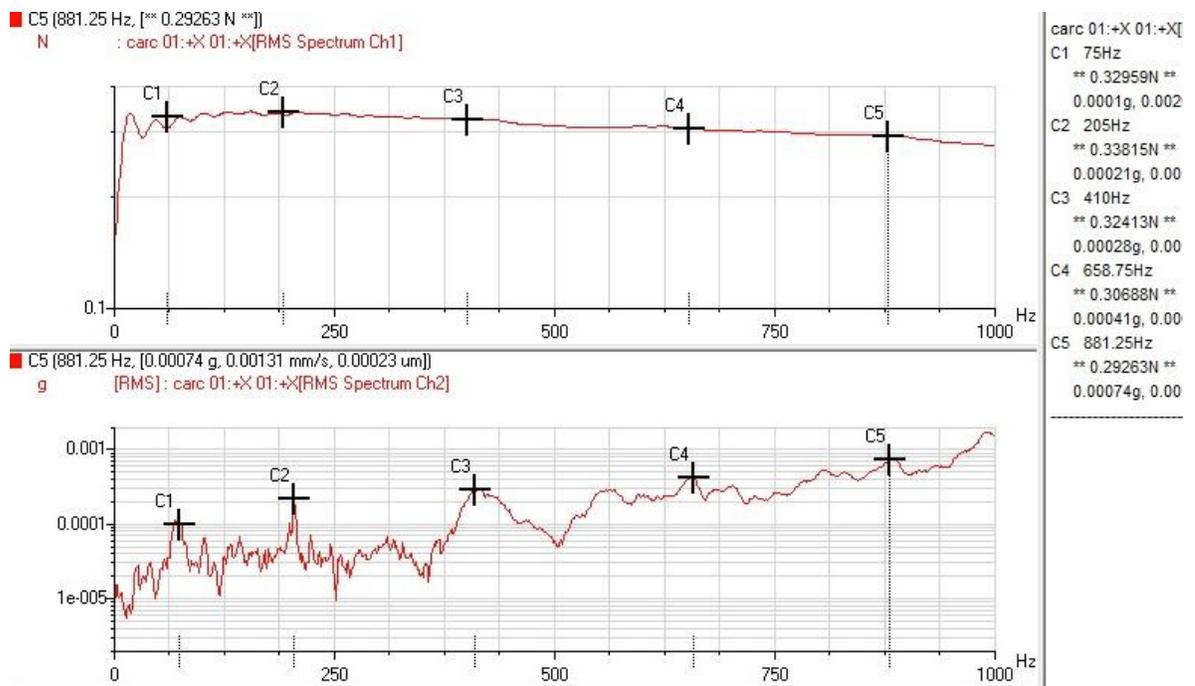


Figura 4-18 Test de impacto en carcasa con agua. [Elaboración propia]

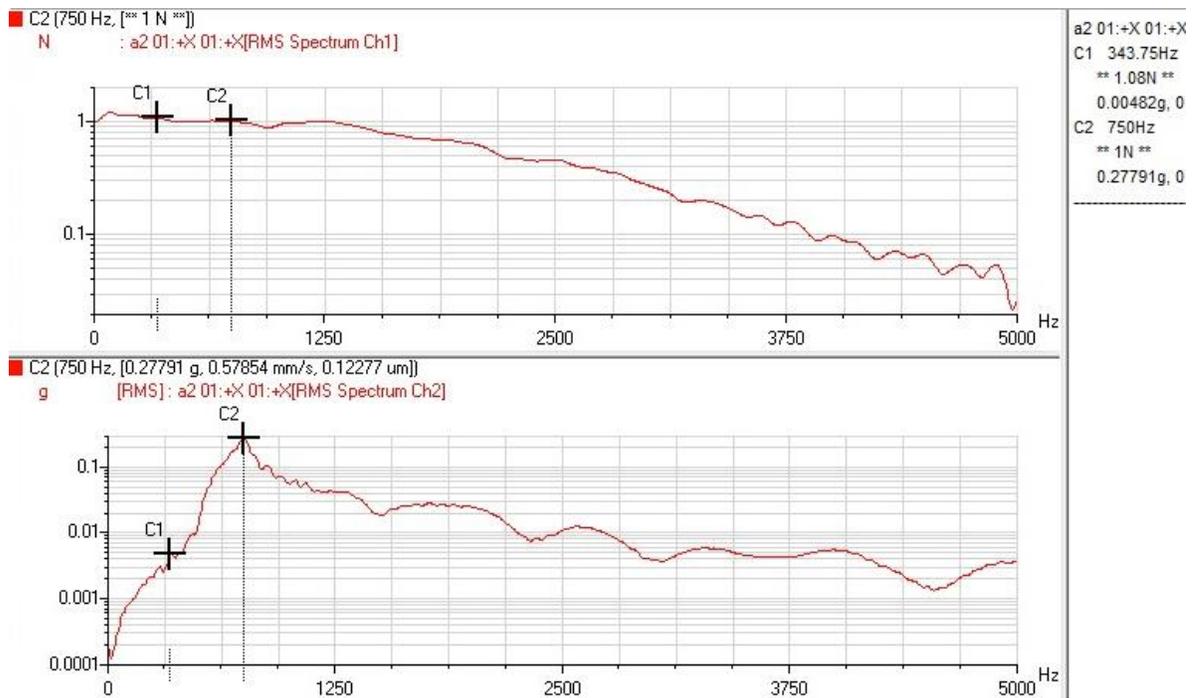


Figura 4-19 Test de impacto en álabo directriz sin agua. [Elaboración propia]

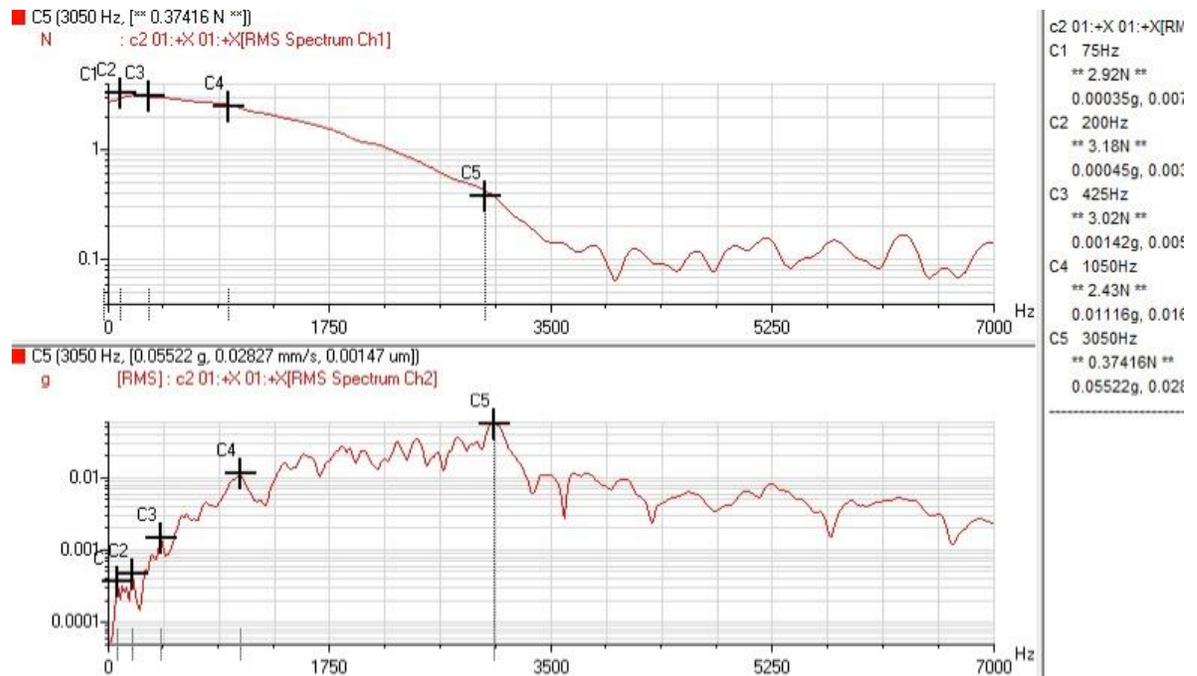


Figura 4-20 Test de impacto en carcasa sin agua. [Elaboración propia]

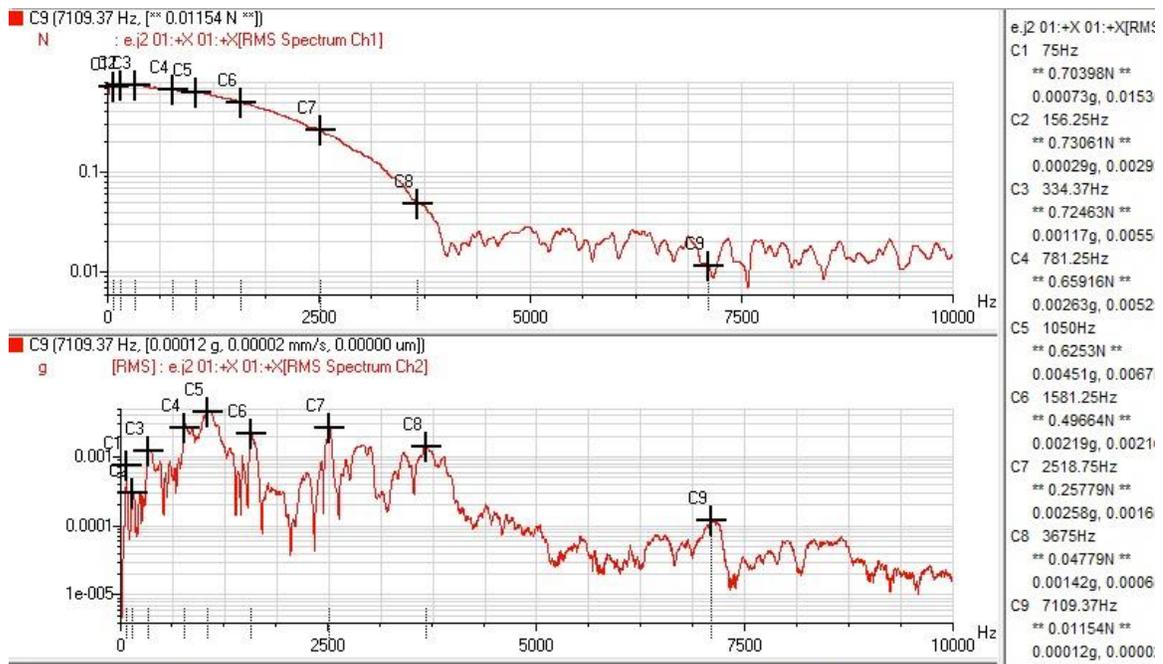


Figura 4-21 Test de impacto en eje sin agua, respuesta radial. [Elaboración propia]

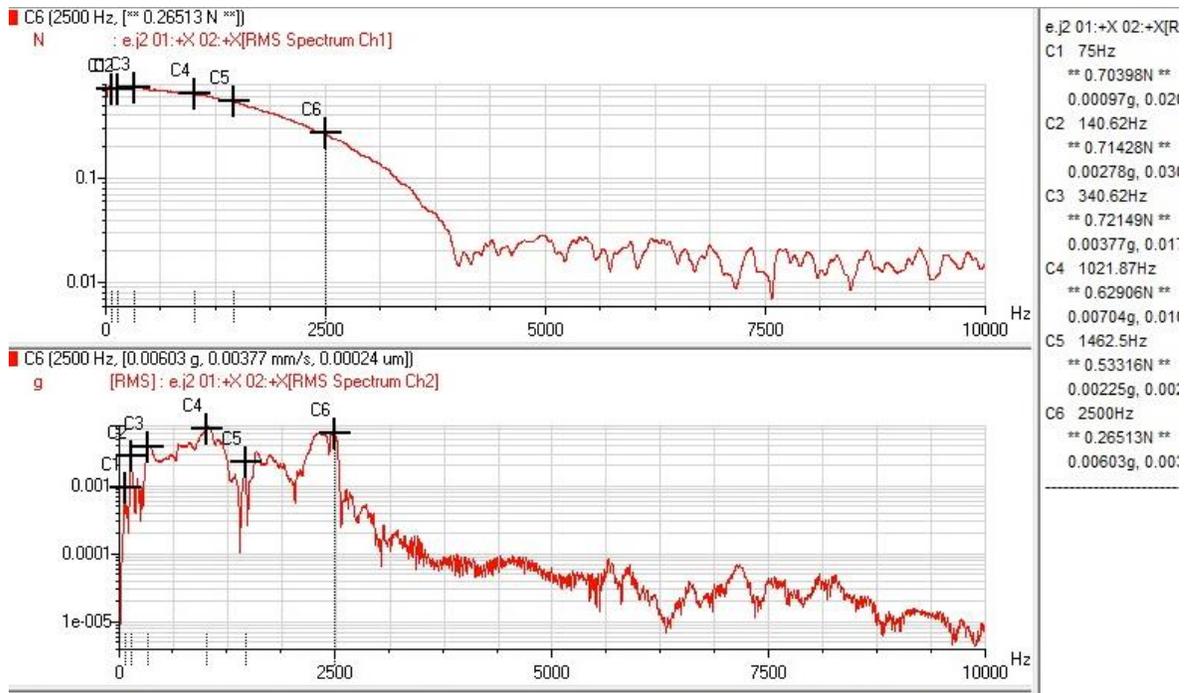


Figura 4-22 Test de impacto en eje sin agua, respuesta axial. [Elaboración propia]

De los gráficos anteriores se puede concluir lo siguiente para los ensayos con agua:

- De la Figura 4-14 y Figura 4-15 se observa que la máxima respuesta en ese canal esta alrededor de 760Hz y en la segunda (álabe contiguo) existen múltiples resonancias.
- De la Figura 4-16 y Figura 4-17 se observan resonancias muy marcadas al hacer el test en el eje: ambas direcciones tienen en común 87.5Hz y 2500Hz. Además en dirección radial se observa 775Hz y 1087Hz

- De la Figura 4-18 se observa una resonancia a 75Hz y otras a mayores frecuencias. Además se observa que la respuesta es mayor a mayor frecuencia, por lo que se puede concluir que la frecuencia natural de la instalación es mayor a 1kHz.

En el caso de los ensayos sin agua:

- De la Figura 4-19 obtenemos un peak a 343.75~350Hz y el máximo a 750Hz.
- En la Figura 4-20 observamos peaks marcados a 75, 200, 425 y 1050Hz.
- En la Figura 4-21 se obtienen múltiples peaks repitiéndose de los casos anteriores 75, 1050 Hz.

Comparando ambos casos se tiene:

- Se presenta en varios los puntos una frecuencia de resonancia de 75Hz para ambos estados.
- En álabes directriz la frecuencia característica difiere en 10Hz entre ambas pruebas: 760Hz con agua y 750Hz con la turbina drenada, es decir 1.3%.
- En el descanso se observa una resonancia importante a 1087Hz con agua y 1050Hz estando drenada la turbina, es decir 3.5% de diferencia.

Se estima que entre el rodete de la turbina y la corona directriz deben haber unos 15 litros, es decir 15[kg] de agua. Esta masa se considera del mismo orden de magnitud que la de las piezas mencionadas, por lo que el cambio en frecuencia natural esperado sería mayor que los obtenidos. Una posibilidad es que la válvula de entrada no fuese estanca, o que al detener la turbina no se llenase esta completamente de agua por que esta escurriese sin llenar el rotor.

4.2.2.4 Frecuencias esperadas:

De acuerdo a los datos de la Tabla 4-1, se tienen las siguientes frecuencias características para la turbina, que se presentan en la Tabla 4-5. De ahí se puede concluir que es esperable observar las componentes de 15x y 150x en los espectros.

Tabla 4-5 Frecuencias características de la turbina Francis

Frecuencias características	Fórmula general	Valor para ensayo 2
Giro (1x)	$F=RPM$	$F=5Hz$
Paso de álabes (Fp)	$F = RPM * n_{\text{álabes}}/60$	$F=300*15/60=75Hz$
Paso de álabes por directriz	$F = RPM * n_{\text{álabes}}n_{\text{directrices}}/60$	$F=300*15*10/60=750Hz$

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.5 Aceleración global:

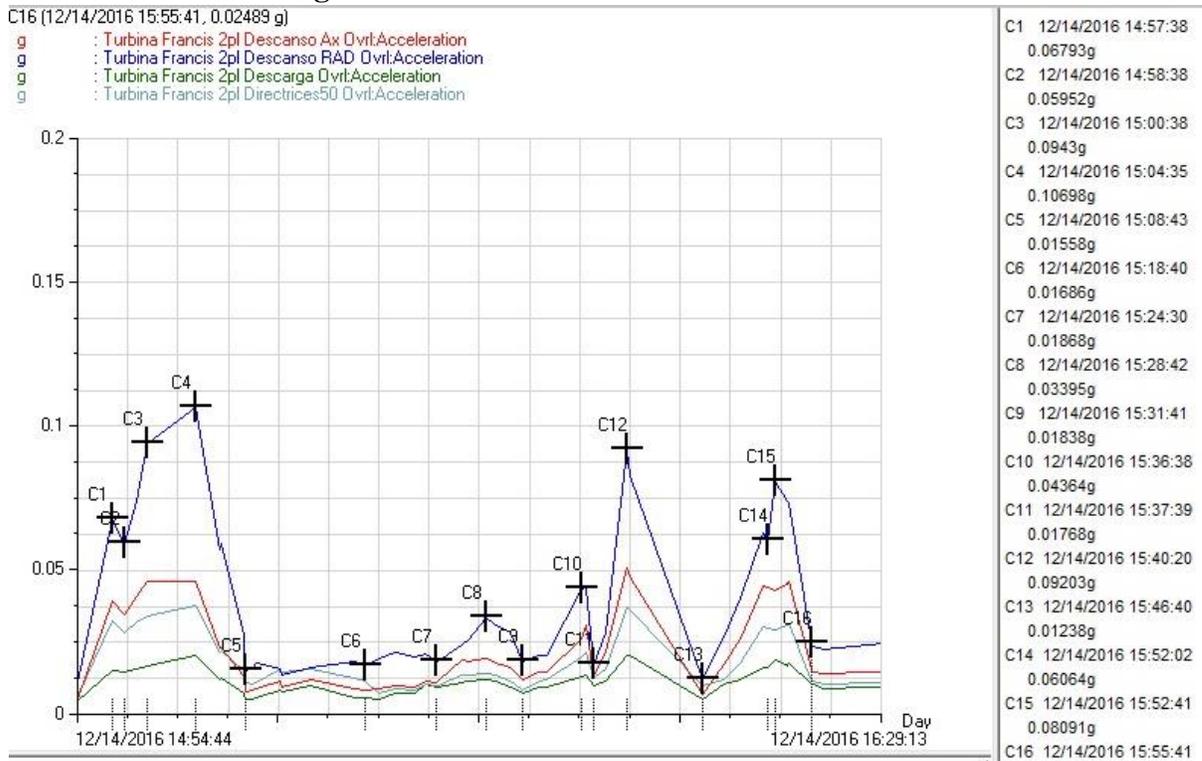


Figura 4-23 Aceleración global en los 4 canales [Elaboración propia, extraído de software]

El gráfico de aceleración global que se observa en la Figura 4-23 muestra la aceleración RMS en los 4 puntos de medición, luego de filtrar solo las medidas correspondientes a los 3 ensayos realizados. De ahí se puede desprender:

- La tendencia es la misma en todos los puntos de medición, pero más marcada en el descanso dirección radial, por lo que este es el punto más significativo para medir pero no se excluyen los otros.
- La aceleración es máxima a las 15:04, 15:40 y 15:52. En los 3 puntos se observa cavitación en la turbina pero también corresponden a los instantes en que la turbina estaba girando a alto régimen (sobre 500RPM), por lo que un desbalance en el rotor podría influir en este valor. Sin embargo, el hecho que la tendencia se repita en la dirección axial y en los otros puntos indica que ese no es el único responsable de la tendencia y si está influenciada por el comportamiento fluidodinámico.
- La aceleración se mantiene en niveles bajos en ciertos períodos con mínimos a las 15:08, 15:31, 15:37 y 15:46. Estos últimos corresponden a puntos en que se observa flujo laminar o con pequeñas perturbaciones y que la turbina está girando a su régimen óptimo (300RPM)

Es importante considerar que ya que se trabaja con aceleración, este valor es sensible a excitaciones de mayor frecuencia que la velocidad vibratoria o el desplazamiento.

4.2.2.6 Análisis de espectros:

A partir de los espectros de aceleración en función de la frecuencia se puede predecir comparando dos mediciones cuál de las dos corresponde a un flujo estable o a un flujo con perturbaciones o cavitaciones, en la Figura 4-24 se observan espectros de condición sin cavitación (15:17) y con perturbaciones leves pero visibles a las 15:21.



Figura 4-24 Comparación de espectros en la descarga a las 15:17 y 15:21 [Elaboración propia, extraído de software de procesamiento]

En el caso de la dirección axial también se marca notoriamente el cambio entre las 15:09 y las 15:11 como se ve en la Figura 4-25.

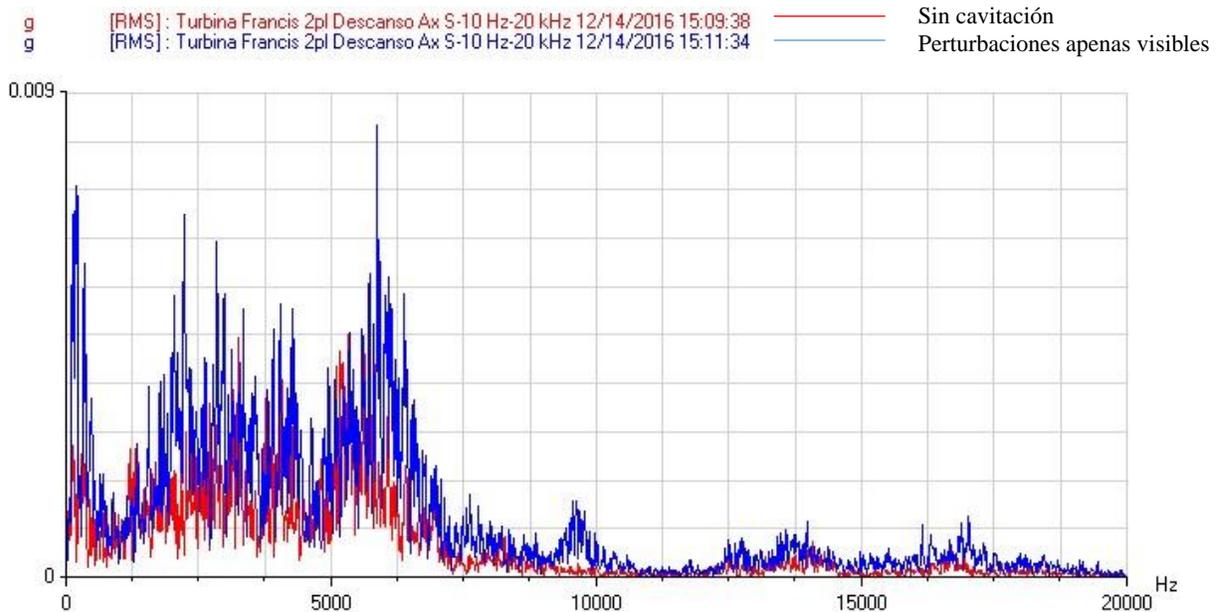


Figura 4-25 Superposición de espectros en dirección axial a las 15:09 y a las 15:11 [Elaboración propia]

Se observa en espectros de cascada filtrado (Figura 4-26 y Figura 4-27) aumento en la amplitud de las componentes de baja frecuencia y excitaciones leves de alta frecuencia en la banda alrededor de 7000Hz y 15000Hz entre las 15:21 y 15:30, que corresponde al episodio de

cavitación del ensayo 2. Además componentes importantes a baja frecuencia a las 15:11 en el álabe directriz que corresponde a un episodio con cavitación en el ensayo 1.

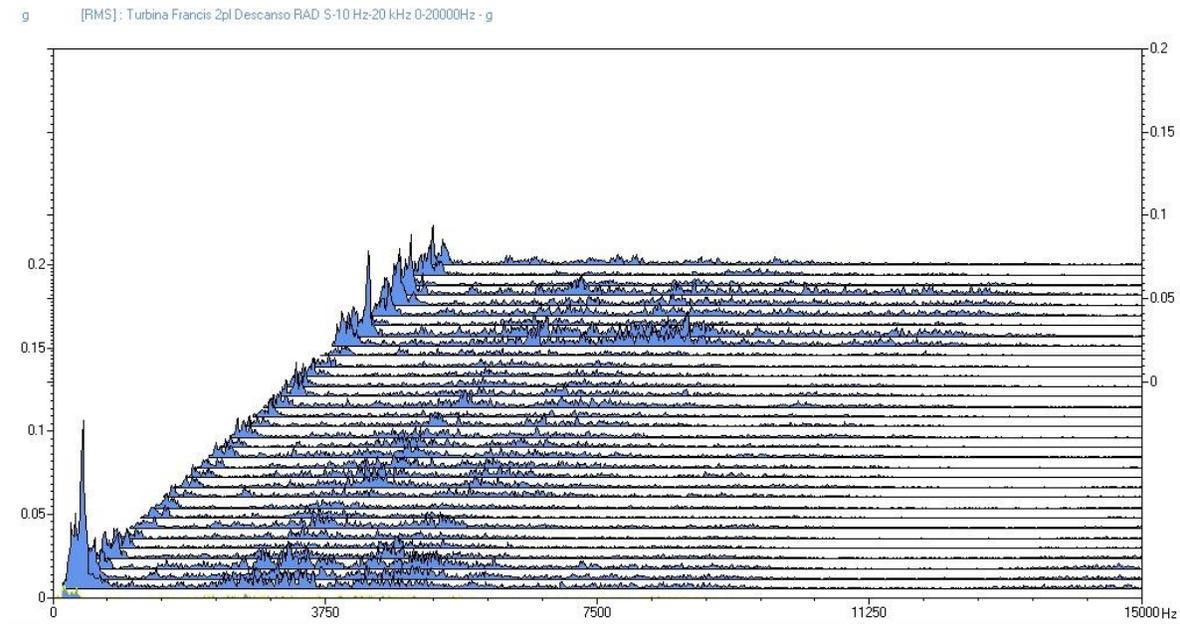


Figura 4-26 Espectro en cascada en descanso dirección radial [Elaboración propia]

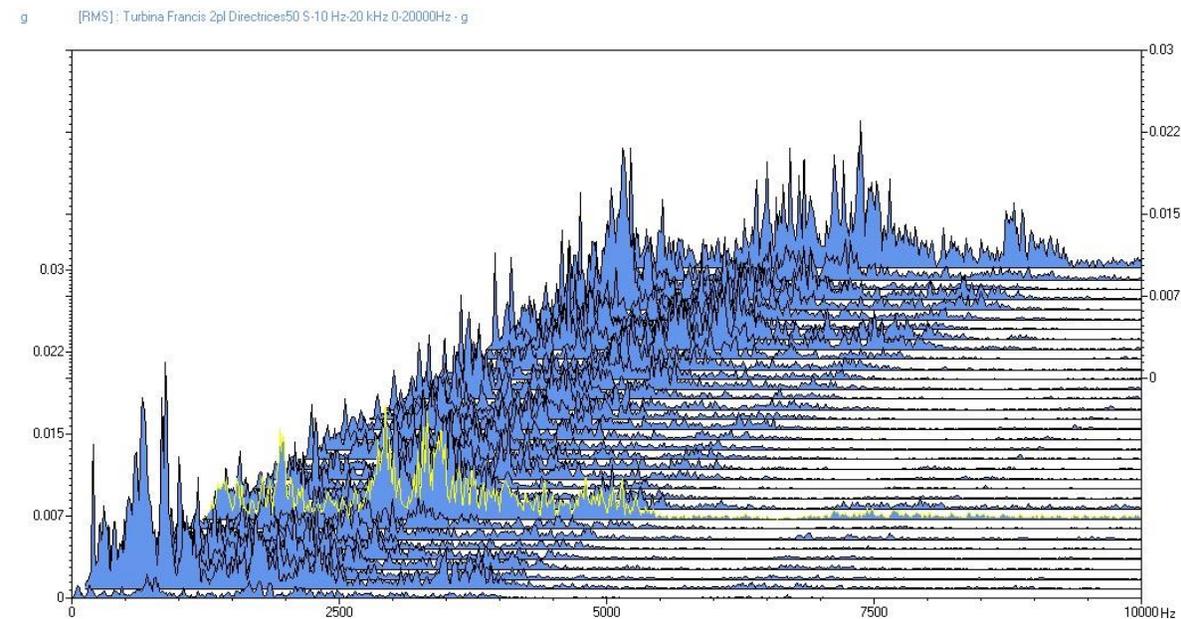


Figura 4-27 Espectro en cascada de álabe directriz [Elaboración propia]

Respecto a las frecuencias naturales de la instalación, obtenidas mediante los test de impacto se observa su presencia en los siguientes espectros:

A continuación se presentan los espectros del ensayo 2 con sus respectivas componentes resaltadas.



Figura 4-28 Espectro dirección Radial condición óptima de flujo [Elaboración propia, extraído de software]



Figura 4-29 Espectro dirección radial con caudal a 90% del nominal [Elaboración propia]

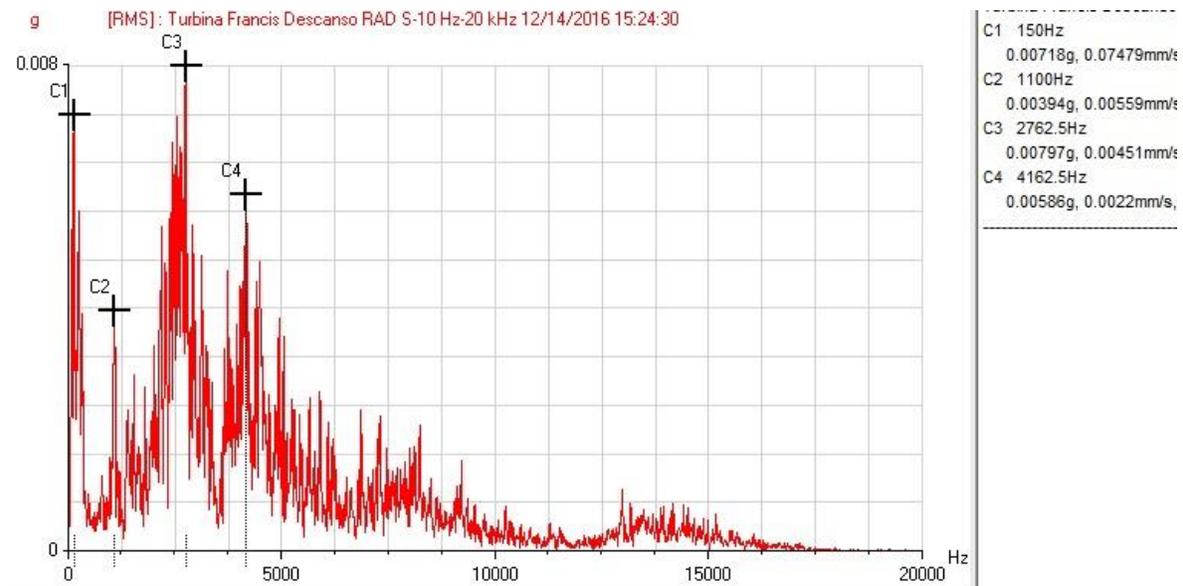


Figura 4-30 Espectro en dirección radial en condición de cavitación [Elaboración propia]

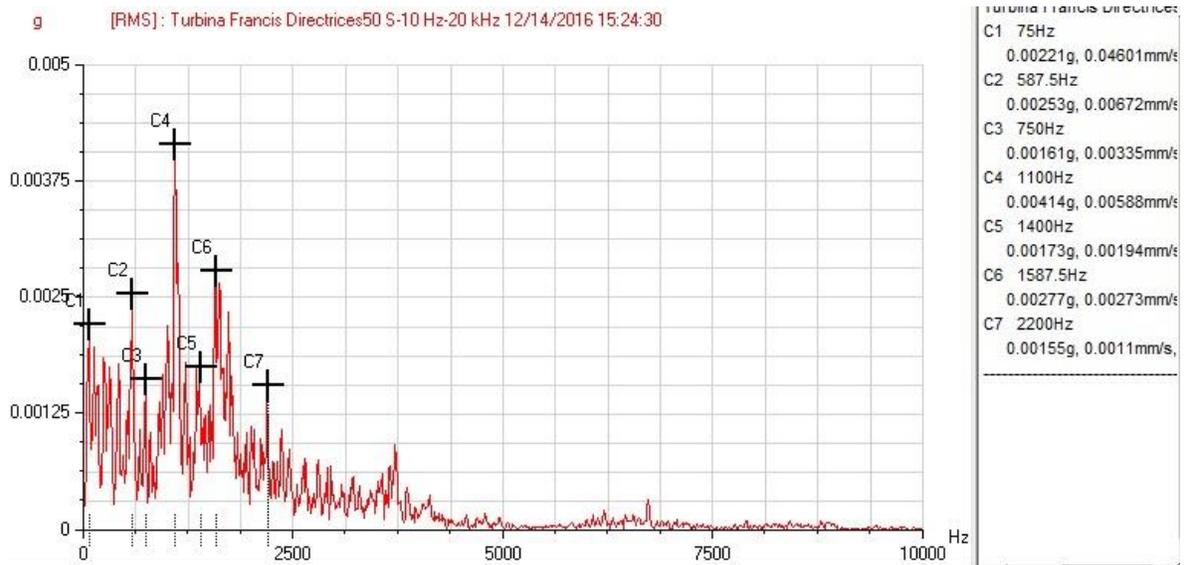


Figura 4-31 Espectro en álabe directriz en condición de cavitación [Elaboración propia]

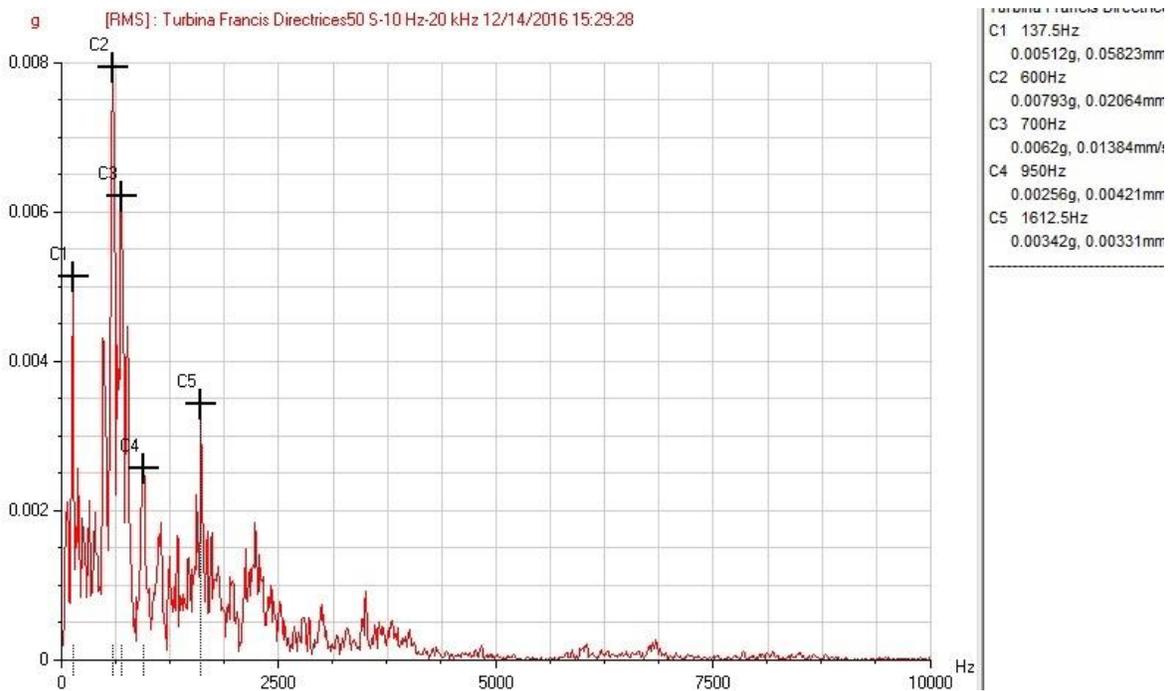


Figura 4-32 Espectro dirección radial en condición de cavitación [Elaboración propia]

Se puede desprender lo siguiente:

- Se aprecia en todos los espectros ya sea la componente F_p (75Hz) o $2x F_p$ (150Hz). Ésta tiene mayor amplitud a las 15:29 con 0.005g y a las 15:17 con 0.011g.
- A las 15:17, donde el flujo es supuestamente estable se detecta una componente a 1075Hz que corresponde a una de las frecuencias de resonancia, detectada mediante el test de impacto.
- Las medidas de las 15:19 y 15:24 son las que tienen menor amplitud en todo el espectro.
- Se observa componente a 750Hz (frecuencia de encuentro de álabe con directriz según Tabla 4-5) a las 15:24.
- Hay una componente a 600 o 662Hz en los espectros de las 15:19 y 15:29.

4.2.2.7 Emisiones acústicas:

Los datos obtenidos de emisiones acústicas tienen la misma forma que los de vibraciones, en la Figura 4-33 se observa una forma de onda.

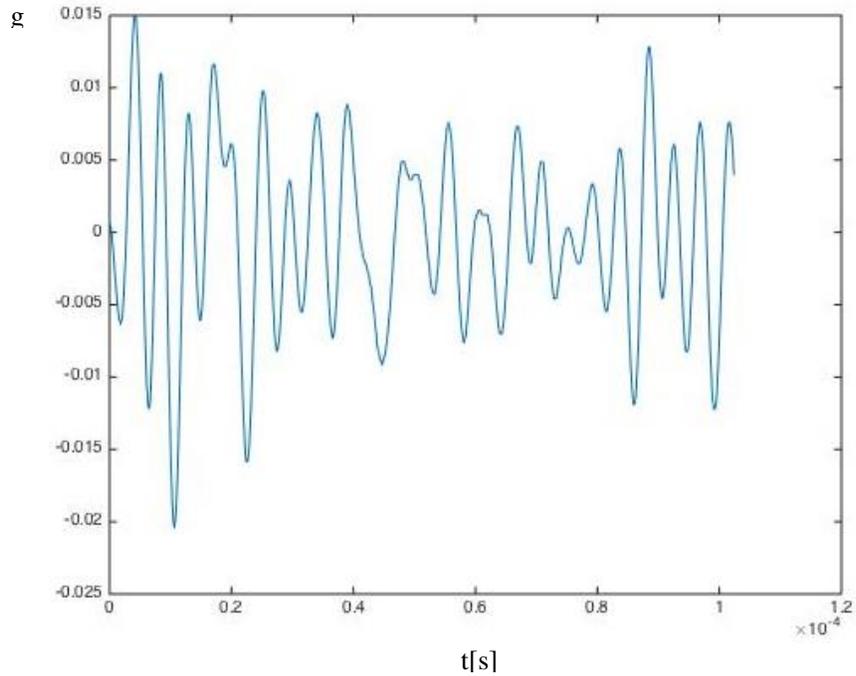


Figura 4-33 Forma de onda en álabes directriz a las 14:54 [Elaboración propia]

Sin embargo al calcular la FFT se tiene una menor resolución en frecuencia ya que cada muestra puede tener máximo 1024 puntos. La prueba se realizó con una frecuencia de muestreo de 10MHz, al observar los espectros como el de la Figura 4-34, se aprecia que sobre 1MHz no hay componentes importantes, por lo tanto para una próxima prueba se propone bajar la frecuencia de muestreo a 3 o 5MHz para tener mayor resolución en frecuencia.

En la Figura 4-35 se ve un notorio aumento de amplitud de más de 50% en el peak de 224400Hz respecto a la situación sin cavitación (Figura 4-34)

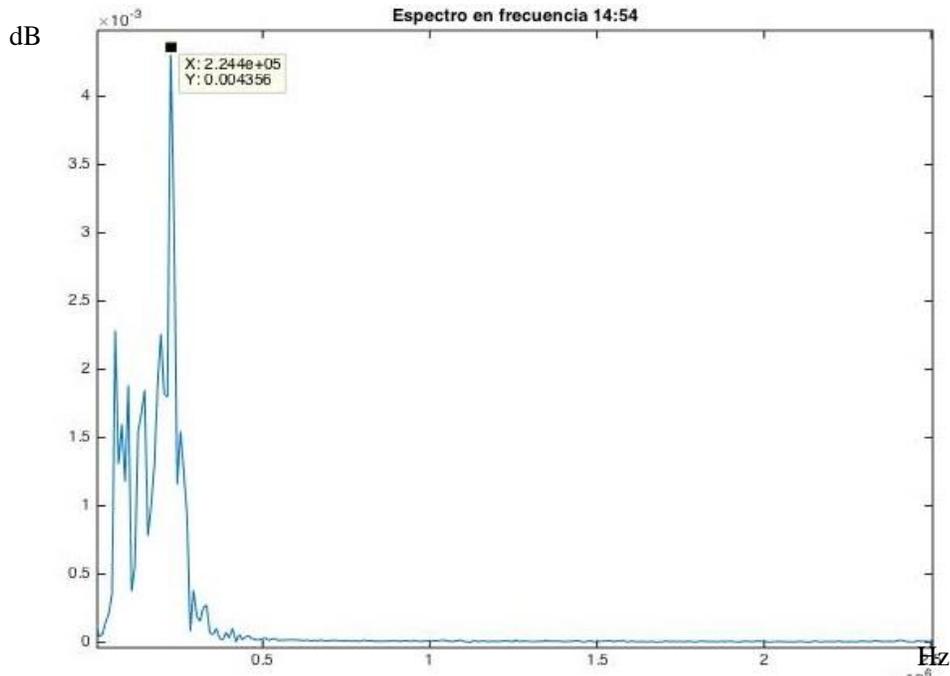


Figura 4-34 Espectro de emisiones acústicas en álabes directriz 14:54 [Elaboración propia]

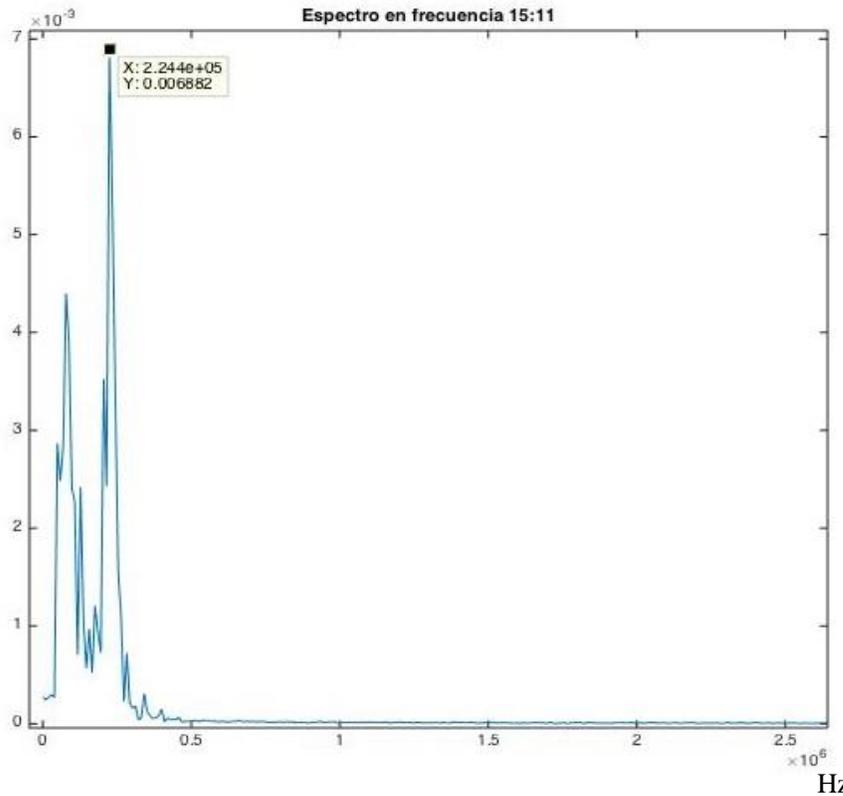


Figura 4-35 Espectro de emisiones acústicas en álabes directriz 15:11 [Elaboración propia]

Los datos de AE se procesan de la misma forma que los obtenidos de acelerómetros.

4.2.2.8 Análisis de Kurtogramas y demodulación

Se aplicarán las técnicas de [21] (descrito en sección 3.4) que corresponden a una demodulación de la señal seleccionando la banda de frecuencia como la que tenga mayor Kurtosis. Para este análisis se usa la señal con la mayor frecuencia de muestreo (51.2kHz) y con eso, aplicando el teorema de Nyquist se obtiene el Kurtograma hasta 25kHz.

La Kurtosis es calculada mediante la ecuación (4.2) con n el número de datos X_i el valor en i y X_{avg} el promedio de la muestra.

$$K = n \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{avg})^4}{(\sum_{i=1}^n (X_i - X_{avg})^2)^2} \quad (4.2)$$

Este análisis se realizará a partir del código Matlab preparado por el autor del método J. Antoni [22]. Los pasos que se siguen son los siguientes:

- Transformada tiempo frecuencia de la forma de onda obtenida con el equipo considerando su respectiva frecuencia de adquisición.
- A partir de ella calcular el kurtograma rápido usando la rutina de Matlab, como se observa en la Figura 4-36.
- Selección de la frecuencia con mayor Kurtosis para realizar la demodulación o extracción de envolvente, en el caso de la Figura 4-36, donde se encuentren los colores más cercanos

al amarillo. Se debe seleccionar la frecuencia y el nivel, que corresponde al ancho de banda del filtro que se aplicará.

- Análisis espectral de la envolvente. Matlab entrega la señal original, su envolvente y una transformada de esta como se ve en la Figura 4-39.

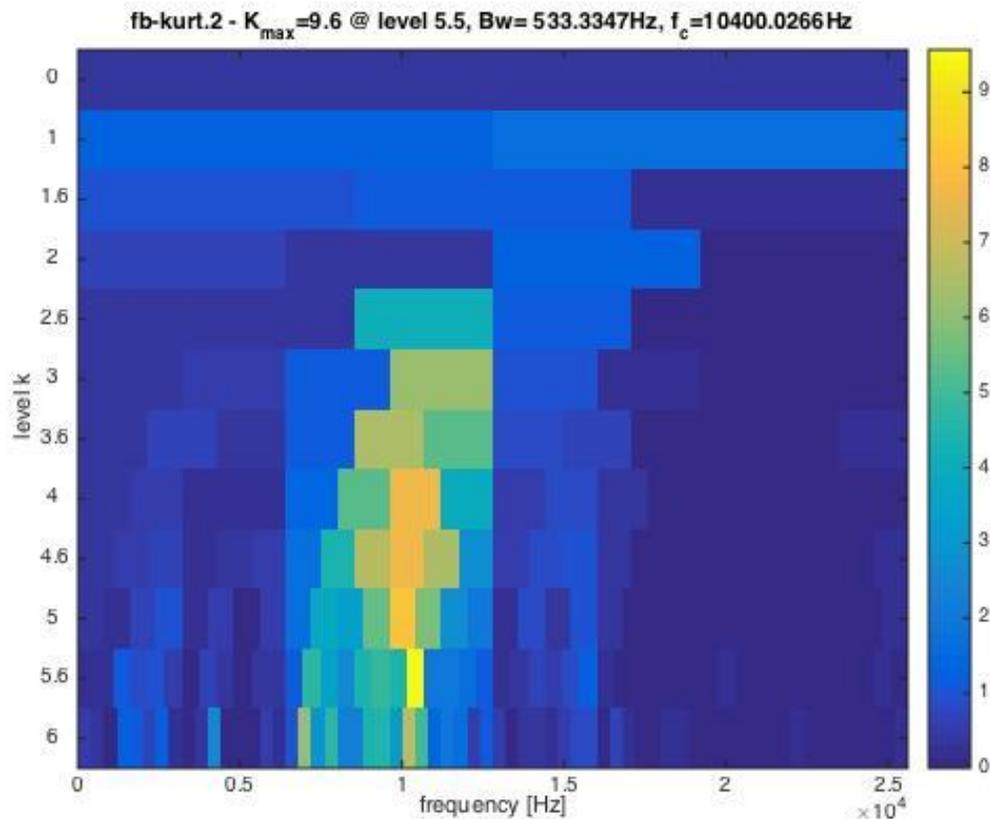


Figura 4-36 Kurtograma en condiciones de cavitación (15:27) generado por la Matlab [Elaboración propia]

Este grafico (Figura 4-36) corresponde a la Kurtosis (color) en función de la frecuencia (eje x) y del nivel (eje y). Este último parámetro es el correspondiente ancho de banda considerado, donde el nivel 0 es el ancho de banda de todo el rango de frecuencia del kurtograma (en este caso 25kHz) y el nivel 6 el mínimo (en este caso 416Hz).

Este caso correspondiente a la medida tomada a las 15:27 en la descarga, en que de acuerdo a la Tabla 4-2, se presentaban fuertes turbulencias e inestabilidades. Esto se corrobora en el Kurtograma ya que la Kurtosis máxima es $K_{max}=9.6$, un valor importante.

En el mismo gráfico se puede observar que hay alta Kurtosis en la banda de 10kHz entre los niveles 3 y 6, estando el valor máximo en 5.5. Seleccionando como frecuencia de filtro 10500Hz y nivel 3.5 para obtener mayor ancho de banda se obtiene el gráfico de la Figura 4-39.

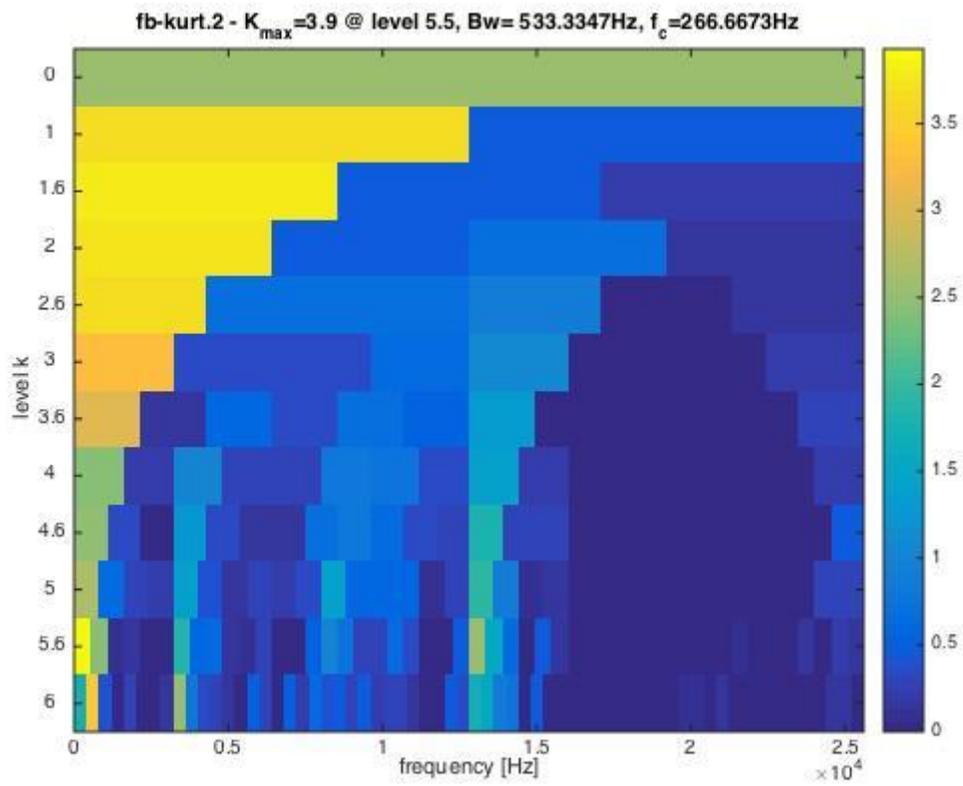


Figura 4-37 Kurtosis en álabo directriz 15:04 [Elaboración propia]

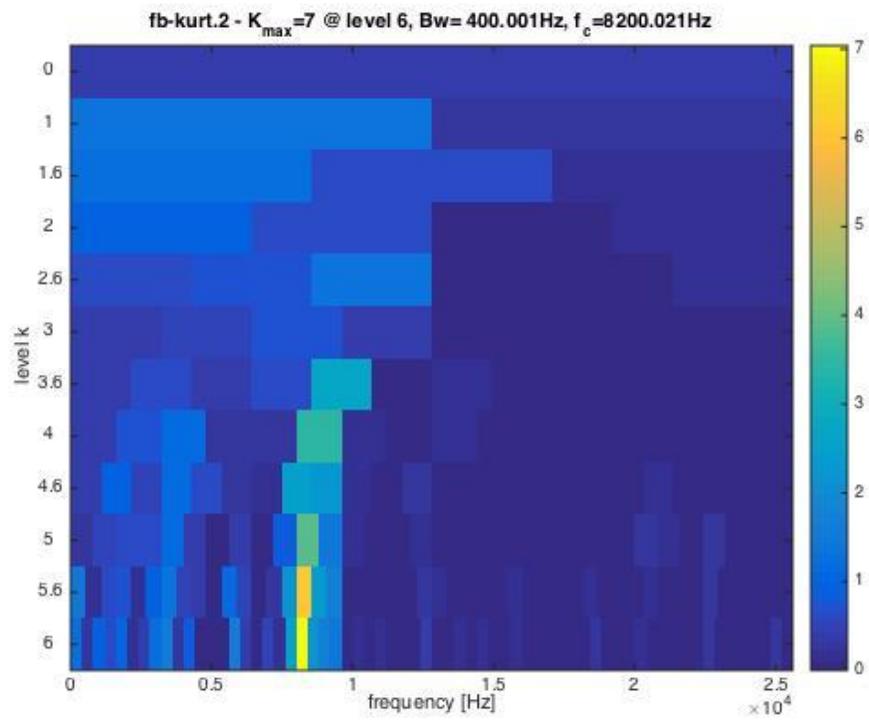


Figura 4-38 Kurtosis en álabo directriz 15:08 [Elaboración propia]

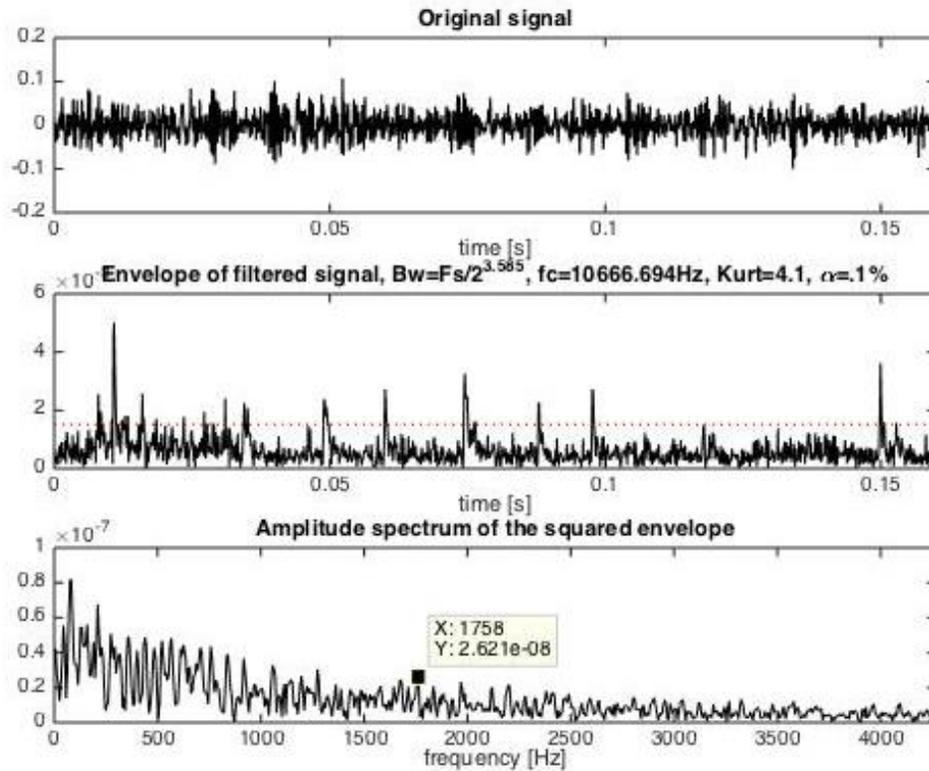


Figura 4-39 Proceso de demodulación de la señal de las 15:27 en la descarga [Elaboración propia, extraído de software Matlab]

Sin embargo, este método no es efectivo para detectar inestabilidades de flujo importantes, en la Figura 4-40 se observa que la medida de las 15:11 donde si se observa cavitación según la Tabla 4-2 y se comprueba en la Figura 4-24, hay menor Kurtosis que a las 15:27 en toda la banda.

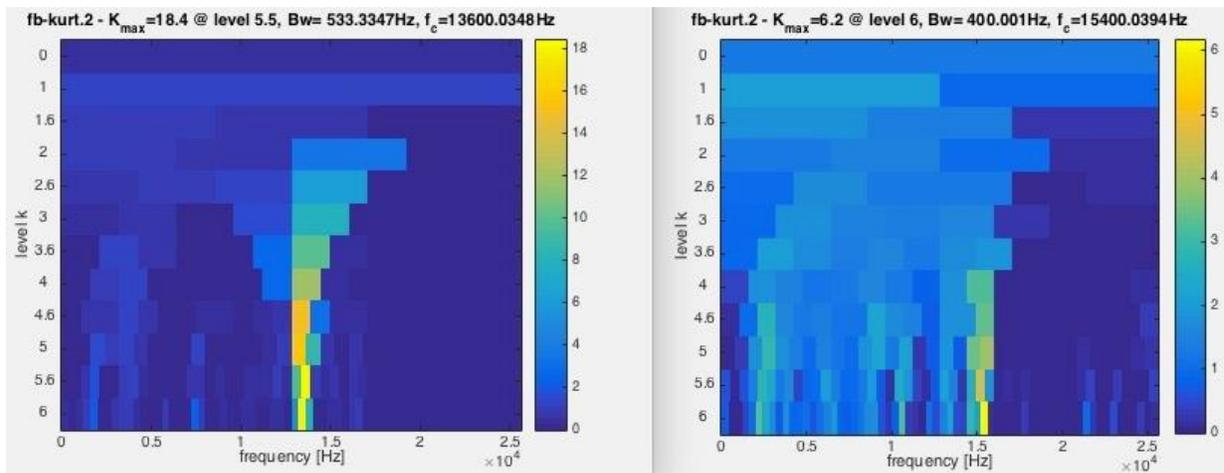


Figura 4-40 Kurtograma en álabes directrices a las 15:17 (izquierda) y alas 15:11 (derecha) [Elaboración propia]

La Kurtosis sin embargo puede ser aplicada para detectar el desarrollo temprano del fenómeno de cavitación. Esto se explica ya que el nivel de Kurtosis aumenta cuando la mayoría de los valores se encuentran cercanos al promedio y los máximos son muy marcados. En la Figura 4-41 se observa como al inicio de un episodio de cavitación (15:22 considerando el ensayo 2) la Kurtosis aumenta hasta 8.4 localmente y luego disminuye a medida que el fenómeno se hace más intenso.

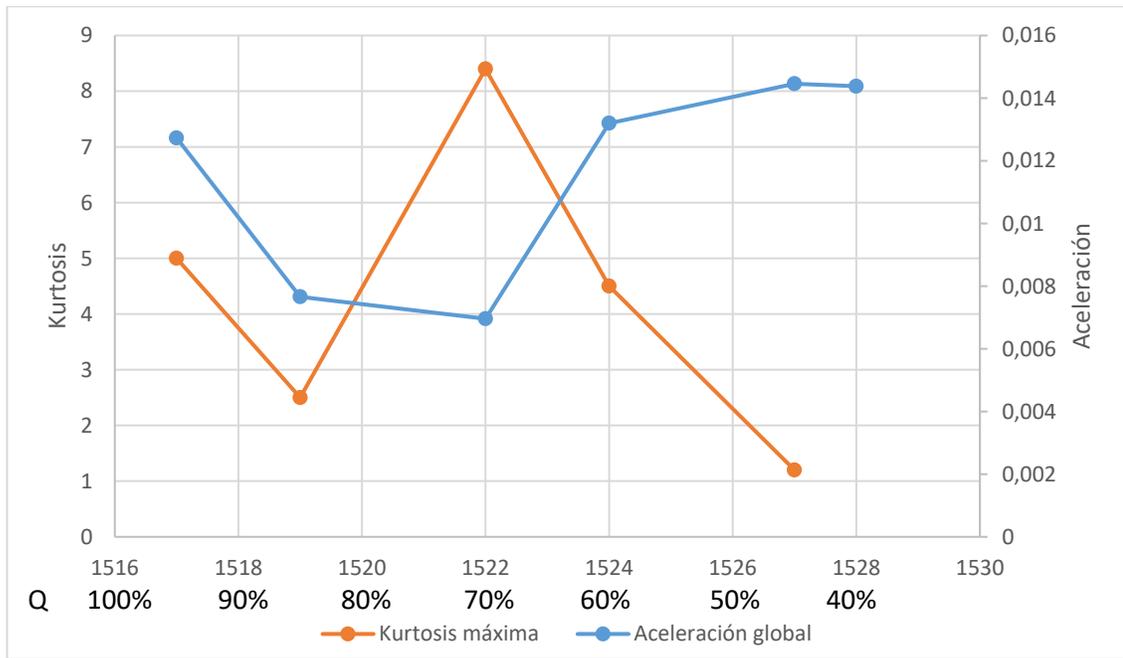


Figura 4-41 Aceleración global y Kurtosis en función del tiempo para el ensayo 2

El aumento de Kurtosis se produce antes de que la aceleración global suba. Este indicador por lo tanto permite detectar tempranamente la aparición de cavitación.

En la sección siguiente, específicamente en la Figura 4-44, se observa un comportamiento similar del Skewness respecto a la Kurtosis. Ambos parámetros pueden ser utilizados por lo tanto.

Para calcular Skewness se usa la ecuación (4.3), muy similar a la (4.2)

$$S = \sqrt{n} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{avg})^3}{(\sum_{i=1}^n (X_i - X_{avg})^2)^{3/2}} \quad (4.3)$$

Respecto a los datos de emisiones acústicas, se encuentra en general una menor Kurtosis sin embargo la señal si se presenta modulada. En la Figura 4-42 se observan los kurtogramas respectivos, donde la diferencia radica principalmente en la banda de 1MHz y ligeramente en el valor máximo.

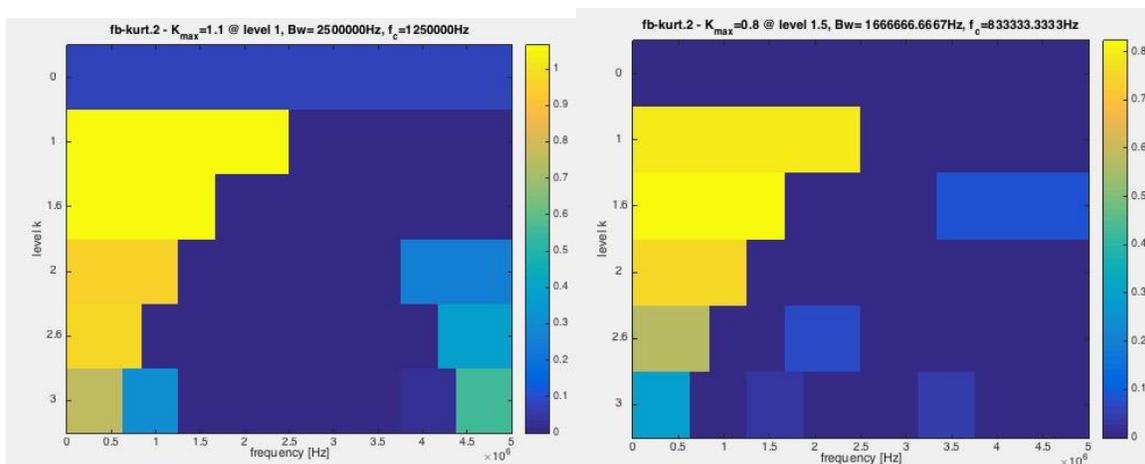


Figura 4-42 Kurtograma a las 14:54 izquierda (laminar) y 15:11 derecha (con cavitación) [Elaboración propia]

4.2.2.9 Parámetros estadísticos

La Tabla 4-6 presenta un resumen de diferentes parámetros estadísticos de las señales calculados para el ensayo 2 y dos puntos del ensayo 1 donde hay carga. Se consideró la medición en álabe directriz porque de acuerdo a la Figura 4-23 es tan representativa como la medida en el descanso pero no esta influenciada por posibles desbalances.

Tabla 4-6 Comparación de parámetros estadísticos para el ensayo 2

Hora	Cavitation	Skewness	RMS	Aceleración global	Crest Factor	Kurtosis máxima
15:04	Si	0.583	0.0517	0.2563	4.953	3.9
15:11	Leve	-0.0190	0.0382	0.1902	4.974	6.2
15:17	No, laminar	0.0275	0.0215	0.0835	3.878	18
15:19	No, laminar	0.0665	0.0169	0.0756	4.473	2.5
15:24	Leve	0.567	0.0462	0.1831	3.964	4.5
15:27	Si, Notoria	-0.0781	0.0169	0.0771	4.563	1.2
15:28	Si, Notoria	-0.112	0.0172	0.0790	4.603	8.0

Fuente: Elaboración propia.

La aceleración global se refiere a un promedio de los valores peak de aceleración en un período de 0.1s, el RMS (Root Mean Square) se refiere al promedio de la raíz de la aceleración al cuadrado, físicamente representa la energía medida y el Crest Factor es la razón entre los dos.

En la Figura 4-43 se observa la aceleración global (en g) para los puntos de la Tabla 4-6.

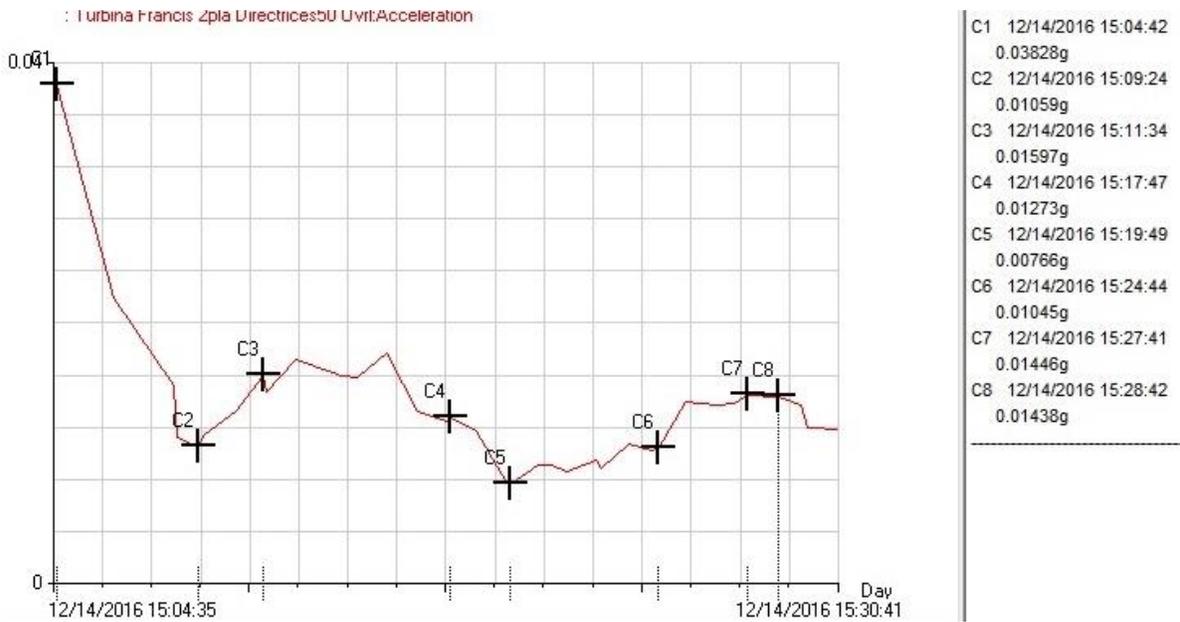


Figura 4-43 Detalle de aceleración global en función del tiempo en álabo directriz [Elaboración propia, extraído de software]

Luego, en la Figura 4-44 se puede ver un gráfico de Skewness y de la aceleración global en una misma escala para comparar la tendencia.

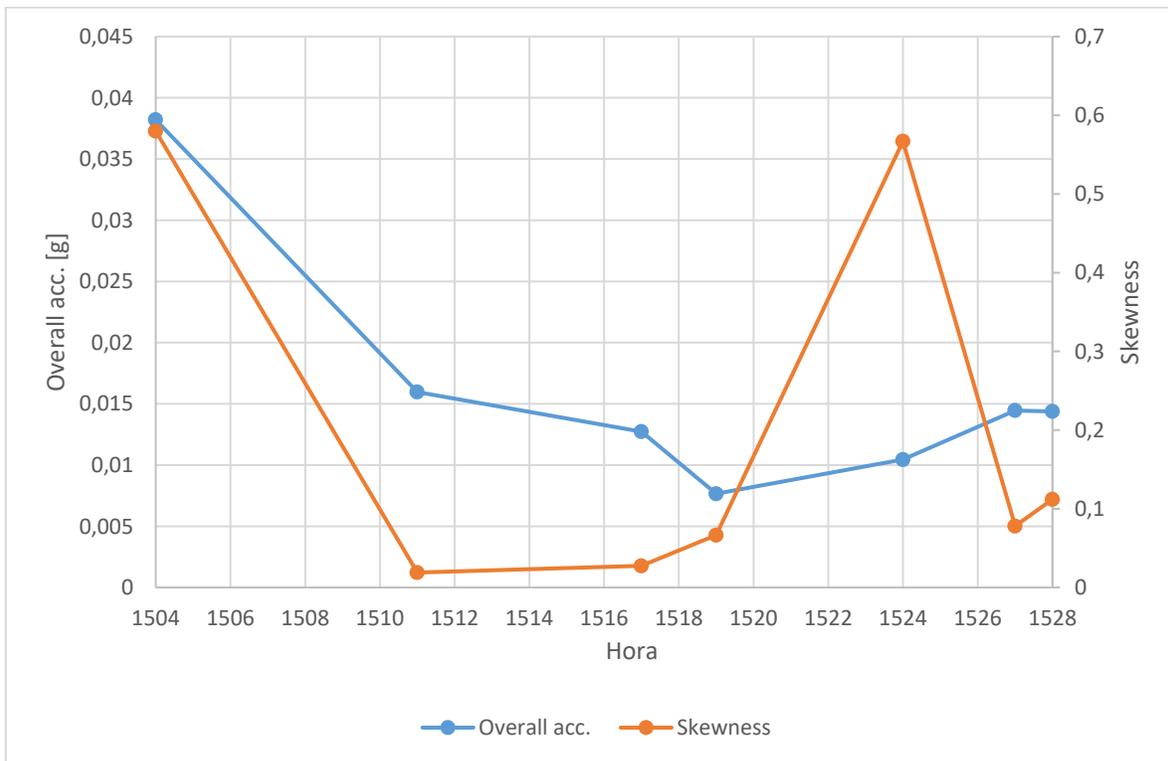


Figura 4-44 Comparación entre Aceleración global y Skewness [Elaboración propia]

Comparando el gráfico de la Figura 4-44 con los espectros (Figura 4-28 a Figura 4-32) podemos observar comportamientos similares: amplitud baja a las 15:19, mayor a las 15:04 y 15:28.

Sin embargo, se presenta un comportamiento especial a las 15:24, este se ve reflejado por el nivel de Skewness, un alto valor de aceleración RMS, un espectro diferente a los demás por tener más peaks marcados, mas ruido y cubrir un mayor rango de frecuencia (Figura 4-30). Este punto también presentó una Kurtosis de 4.5, un poco mayor a los demás de ese ensayo pero no la máxima. Todas estas anomalías permiten asegurar que en este momento había cavitación en los álabes de la turbina además de la cavitación visible en la tubería de descarga. Esto comprueba que el comportamiento del Skewness es similar al de la Kurtosis (Figura 4-41).

4.2.2.10 Empirical mode decomposition (EMD)

Aplicando esta técnica basado en el estudio de [23] se puede separar una señal en componentes por bandas de frecuencia.

Primero se aplica un código Matlab que a partir de esta separación guarda solo las componentes con periodicidad, en la Figura 4-45 se observa la aplicación a las 15:24 (aparición incipiente de la cavitación en el ensayo 2). Se puede apreciar la componente a baja frecuencia presenta. En la Figura 4-47 (espectros en frecuencia de las señales de la Figura 4-45) se observa que es la componente de alta frecuencia la que desaparece y por ende la que origina el ruido.

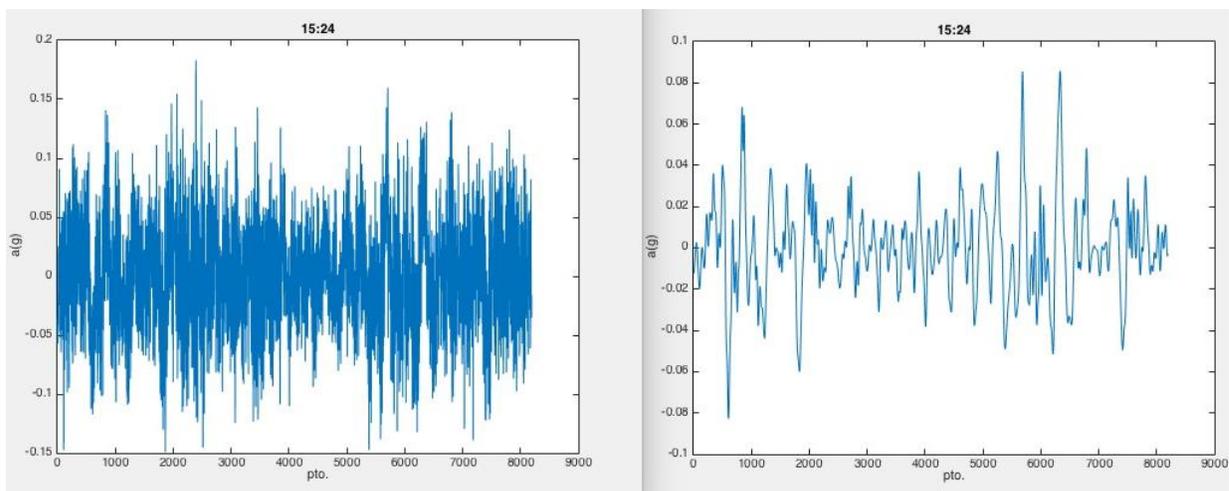


Figura 4-45 Comparación de formas de onda 15:24 (izquierda) y EMD de 15:24 (derecha) [Elaboración propia]

En la Figura 4-46 se pueden observar los modos. Se separan en 10 desde mayor a menor frecuencia. Se observa que los primeros, que corresponden a las mayores frecuencias tienen mayor amplitud que las menores y son señales que tienen muchos impactos. Este comportamiento puede ser de impactos de burbuja en las paredes del rotor.

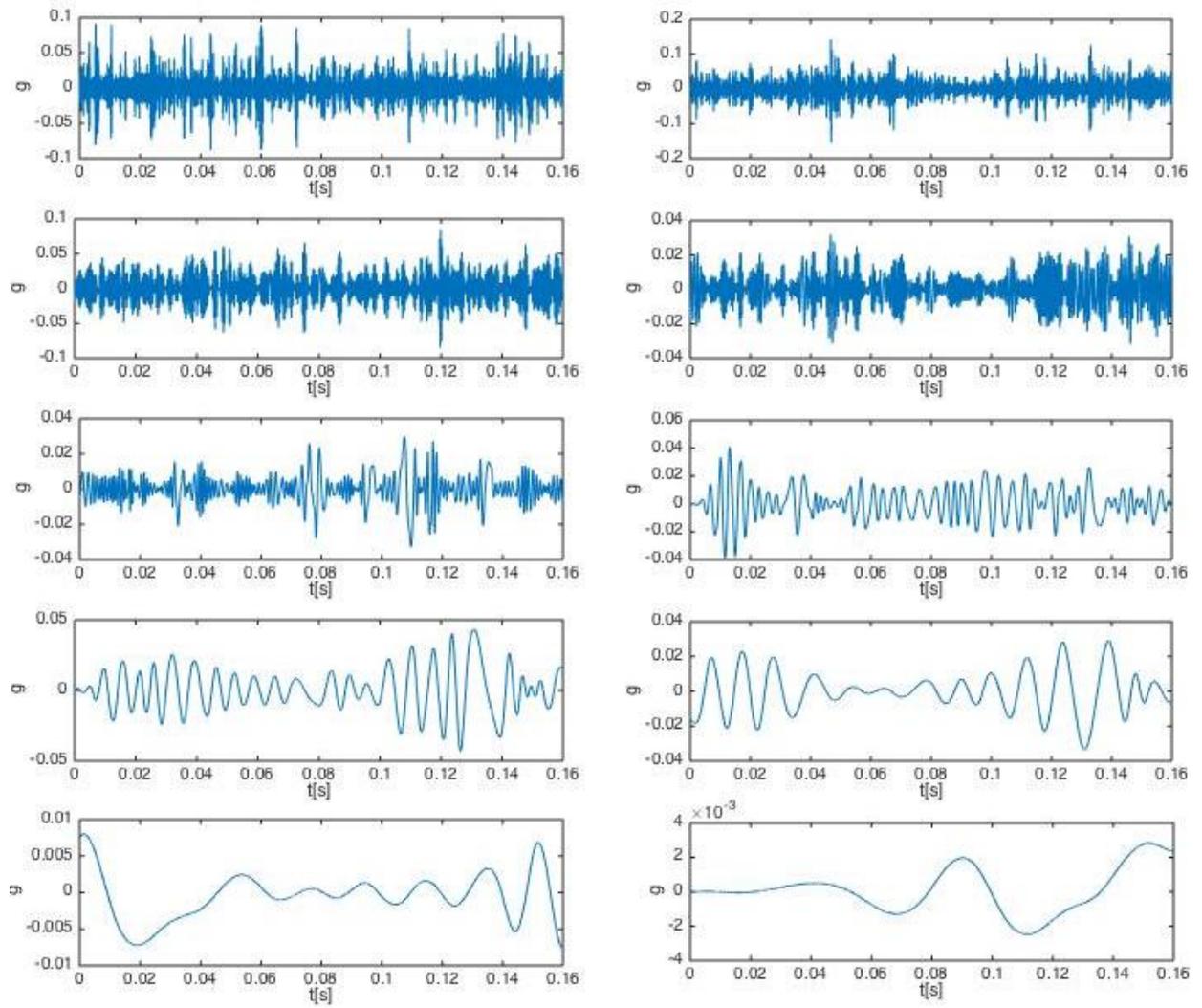


Figura 4-46 Descomposición de modos empíricos de la señal de las 15:24 [Elaboración propia]

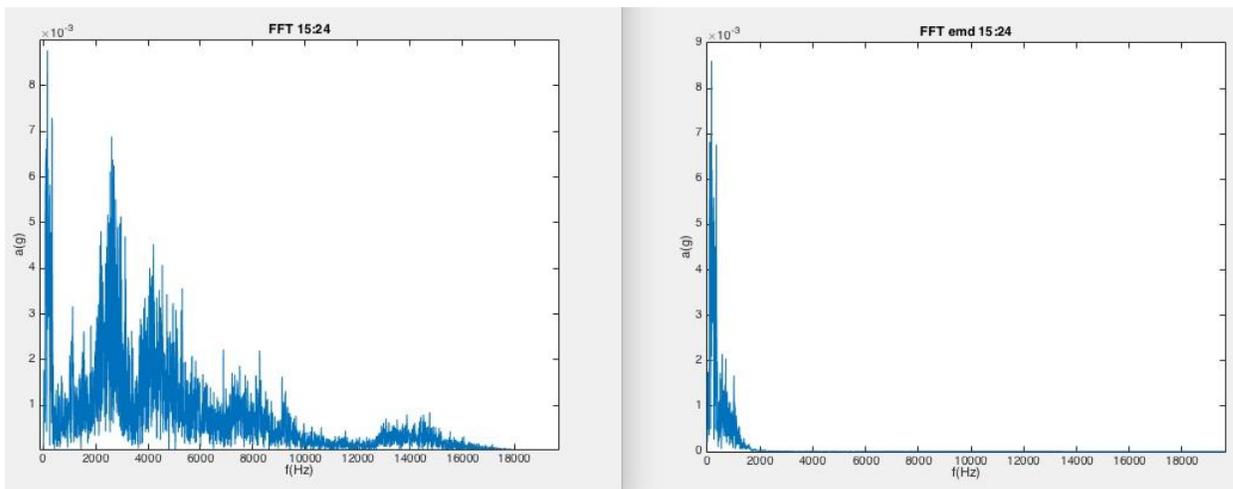


Figura 4-47 Comparación de espectro original (izquierda) y espectro de EMD (derecha) a las 15:24 [Elaboración propia]

4.2.2.11 Filtro pasa banda

Finalmente, en la señal de las 15:22 (Figura 4-48) que corresponde al momento en se aprecian los primeros indicios de cavitación incipiente, se realizan filtros pasa-banda centrados en las frecuencias de resonancia encontradas con el test de impacto (sección 4.2.2.3). En la Figura 4-49 y Figura 4-50 se observan filtros entre 700 y 800 Hz y 1040 y 1080Hz respectivamente.

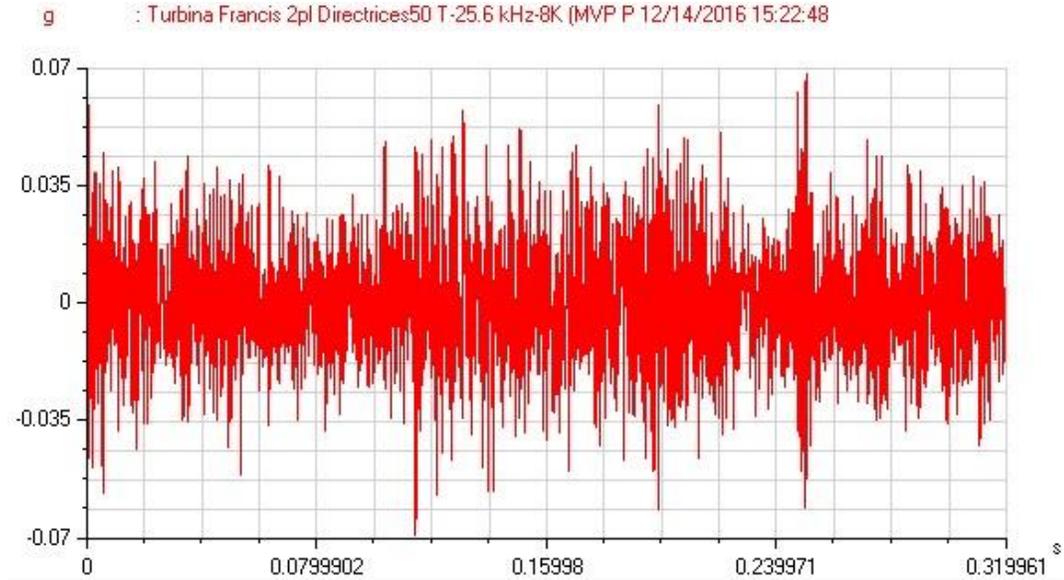


Figura 4-48 Forma de onda 15:22 [Elaboración propia]

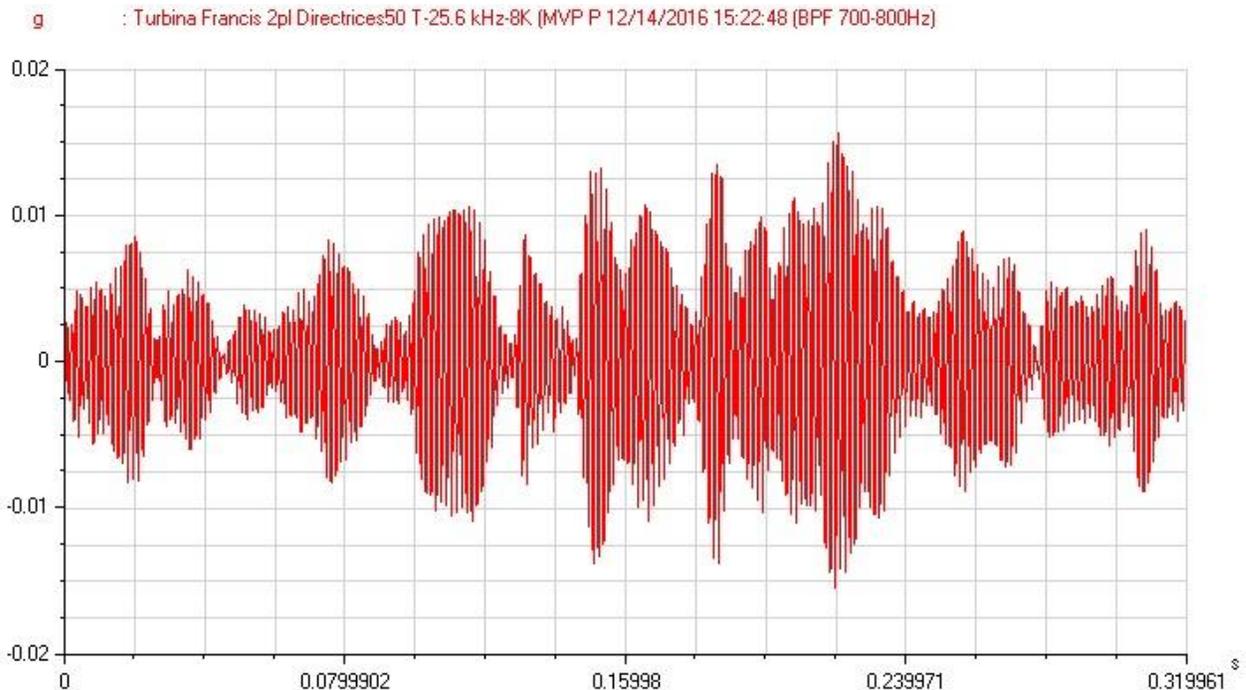


Figura 4-49 Filtro pasa banda 700 a 800Hz 15:22 [Elaboración propia, extraído de software]

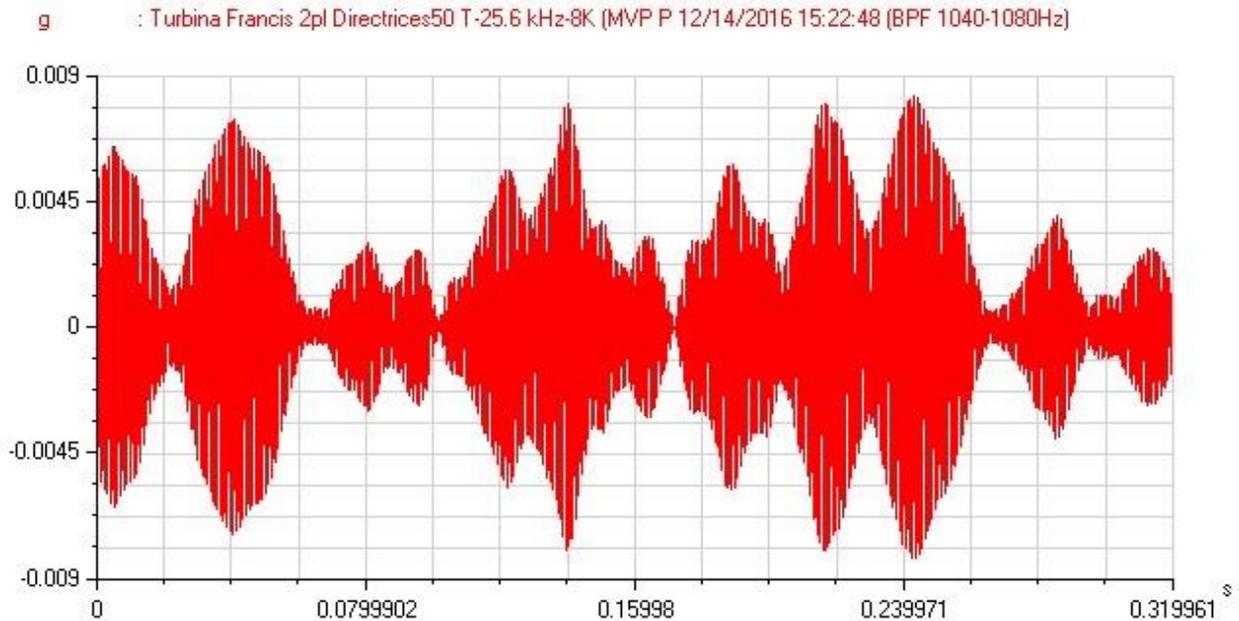


Figura 4-50 Filtro pasa banda 700 a 800Hz 15:22 [Elaboración propia, extraído de software]

Se observa en las figuras anteriores impactos claramente distinguibles que excitan las frecuencias naturales del rodete. Esto confirma la presencia de cavitación.

4.2.3 Análisis y discusión

Un análisis comparativo de aceleración global RMS en cualquiera o en todos los puntos que se consideraron para mediciones permite distinguir directamente episodios de cavitación o inestabilidad de flujo, ya que este valor aumenta significativamente según la intensidad de la cavitación. En el caso del álabe directriz, para el ensayo 2 el valor se duplicó entre el óptimo de operación y el episodio mas notorio de cavitación. Este es entonces la forma más simple de realizar diagnóstico: variar las condiciones de operación y evaluar la aceleración global en distintos puntos de la turbina.

Para cualquier análisis es ventajoso conocer las frecuencias de respuesta propias de la instalación como se hizo en esta prueba con test de impacto. En este caso se identificaron frecuencias naturales que fueron posteriormente detectadas durante las pruebas en la turbina, lo que quiere decir que fueron excitadas por la acción del fluido sobre los componentes de esta.

El análisis de Kurtosis (Figura 4-41) permitió detectar el desarrollo incipiente de una situación de cavitación. Esto se explica ya que cuando esta es leve, la cantidad de burbujas que impactan es menor, y por ello se distinguen peaks aislados en la señal que hacen aumentar la Kurtosis. Sin embargo, cuando el fenómeno es más fuerte, la masa de burbujas que impactan las paredes es mayor y los impactos se superponen y se pierden en la señal, por lo que la Kurtosis disminuye y no sirve como indicador de intensidad de cavitación.

El análisis de emisiones acústicas permite identificar con mayor facilidad simplemente mirando espectros los episodios de cavitación. Esto implica que es una herramienta poderosa para la industria ya que podría gatillar alarmas en tiempo real de forma más rápida y certera. Instalar un

equipo de estos puede resultar igual o más eficiente que instalar acelerómetros para el monitoreo. También puede ser utilizado para monitorear problemas mecánicos en la instalación.

A partir de análisis de espectros de acelerómetros se pueden establecer parámetros representativos, sin embargo resulta más dificultoso establecer criterios determinados para un diagnóstico absoluto ya que el comportamiento varía.

El dato de las 15:24 es significativo en el estudio ya que observando el visor en la descarga la cavitación no se parecía importante, sin embargo, en la Tabla 4-6 se notan alteraciones en los parámetros estadísticos y en la Figura 4-44 se observa una clara diferencia con los parámetros del resto de los datos en la comparación de aceleración global con Skewness. El análisis de EMD (Figura 4-45 y Figura 4-47) permite confirmar que en este punto existe mucho ruido ya que después de aplicar el filtro la señal disminuye en amplitud y en componentes de frecuencia. Este ruido se atribuye a cavitación. Además, al observar uno a uno los modos (Figura 4-46) se ve que en los de alta frecuencia se detectaban impactos y mayor amplitud que en los de baja frecuencia que son los que provienen de defectos mecánicos. Finalmente, al filtrar por la frecuencia natural se observan impactos que se traducen en excitaciones de estas, que pueden ser impactos de burbujas de cavitación. De todos los análisis realizados, se puede extraer que a las 15:24 se produjeron fenómenos de cavitación en álabes de intensidad importante y que requieren de análisis de datos para ser detectados con acelerómetros.

Contrariamente al caso anterior a las 15:27 y 15:28, que es cuando se observan casos de cavitación importante en la descarga de la turbina y se perciben inestabilidades de flujo, no hay grandes perturbaciones y los parámetros estadísticos y de aceleración global se mantienen bajos, lo que indica que en el rotor la cavitación no es tan agresiva como en la descarga.

El análisis que se realizó en base a lo que se observó en la Figura 4-44 permite comprobar que el Skewness resulta ser un parámetro certero a la hora de detectar cavitación y tiene que ser incluido en los modelos ya que se puede calcular directamente a partir de una forma de onda y puede ser monitoreado en tiempo real junto con otros parámetros.

Como rango se puede decir que la turbina estudiada opera de manera segura, es decir sin cavitación agresiva en ningún punto de esta, para las siguientes condiciones de flujo:

- Con álabes abiertos 100% (ensayo 1) velocidad de giro inferior a 400RPM
- Con velocidad de giro constante en el punto de mayor rendimiento (ensayo 2), apertura de álabes entre 100% hasta 50%, dejando fuera el punto de 60% que genera cavitación en el interior de la turbina. Esto corresponde a caudal entre el nominal de la turbina y 70% de este haciendo una interpolación lineal a partir de los valores de caudal que se midieron en el vertedero en “V” (sección 4.2.1.3).

4.3 Prueba en Central Chiburgo

El día 26 de Enero de 2017 se visitó la Central hidroeléctrica Chiburgo, perteneciente al grupo Colbún. Esta cuenta con dos unidades Francis de eje horizontal, en la Tabla 4-7 se presentan las características de las turbinas.

La Central Chiburgo fue construida para aprovechar energía de una fracción del agua del embalse Colbún que debe ser entregada a través de un canal de regadío a los predios colindantes. Es por ello que la condición de operación no esta normada por el Centro de Despacho de Energía como en el resto de las centrales, sino que por los regantes dueños de los derechos de agua. Ellos definen día a día el caudal que requieren en el canal y con ese debe operar la central. Esto la hace interesante para estudio ya que en otoño e invierno bajan los caudales de operación, como también la altura disponible en el embalse y se producen episodios de cavitación o ruidos. En caso de que la altura disponible en el embalse este bajo la mínima especificada para la central (400MSNM), no se permite producir y el agua debe ser entregada directamente al canal de regadío.

Tabla 4-7 Características central Chiburgo

Año de fabricación	2007
Fabricante	Andritz
Número de unidades	2
Potencia nominal unidad	9.233MW
Potencia mínima bruta	3MW
RPM de trabajo	600RPM

Fuente: Coordinador eléctrico nacional SIC [24]

En la Figura 4-51 se observa la turbina Chiburgo 1, donde se realizaron las mediciones.

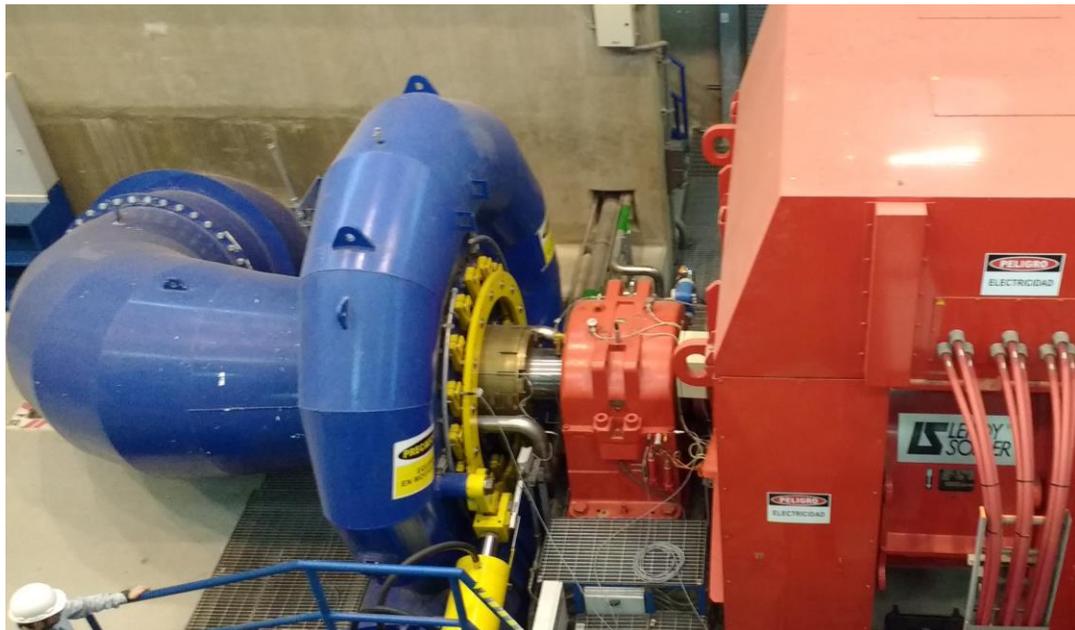


Figura 4-51 Turbina Chiburgo1 [Elaboración propia]

4.3.1 Descripción de la prueba

Por ser época de verano los regantes solicitan la totalidad de sus derechos de agua, por lo que la turbina estaba operando a plena carga con caudal nominal, por lo que según el Jefe de Mantenimiento del complejo, no debería detectarse cavitación o episodios de inestabilidad de flujo importantes.

Para esta prueba, al tratarse de una turbina de eje horizontal, el acceso era fácil por lo que se midió en todos los puntos que se habían seleccionado con anterioridad para la prueba en laboratorio, con la única diferencia que esta instalación tenía un descanso combinado separado del descanso de la turbina, por eso hay un punto adicional que se refiere al descanso de la turbina. Las medidas en dirección radial y axial fueron tomadas en el descanso combinado ya que el descanso de la turbina no era de material ferromagnético por ende se hacía más difícil la instalación de sensores. En la Figura 4-52 a Figura 4-55 se observan los sensores instalados en la turbina.

La turbina central esta equipada con un sistema de monitoreo en línea de vibraciones y se trató de ubicar los sensores lo más cerca posible de los que ya se encuentran instalados para ver la posibilidad de comparar valores.



Figura 4-52 Instalación de sensores axial y radial en descanso combinado [Elaboración propia]



Figura 4-53 Instalación de sensor en álabe directriz [Elaboración propia]

Se midieron formas de onda a 51,2kHz y 12.6kHz de frecuencias de muestreo y FFT entre 10 y 10.000Hz.

Al estar la turbina operando era peligroso el acceso a los álabes directrices (Figura 4-53) ya que estos en caso de trip (desconexión automática de la turbina por alguna falla) se cerrarían automáticamente, por ello solo se pudo instalar un sensor de emisiones acústicas en el descanso de la turbina como se ve en la Figura 4-54.

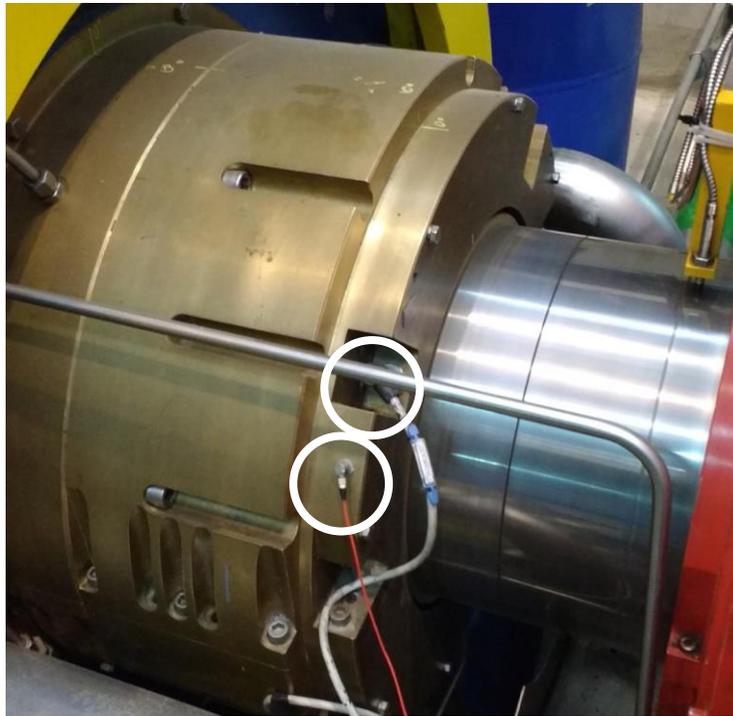


Figura 4-54 Instalación de acelerómetro y sensor de emisiones acústicas en descanso de turbina [Elaboración propia]

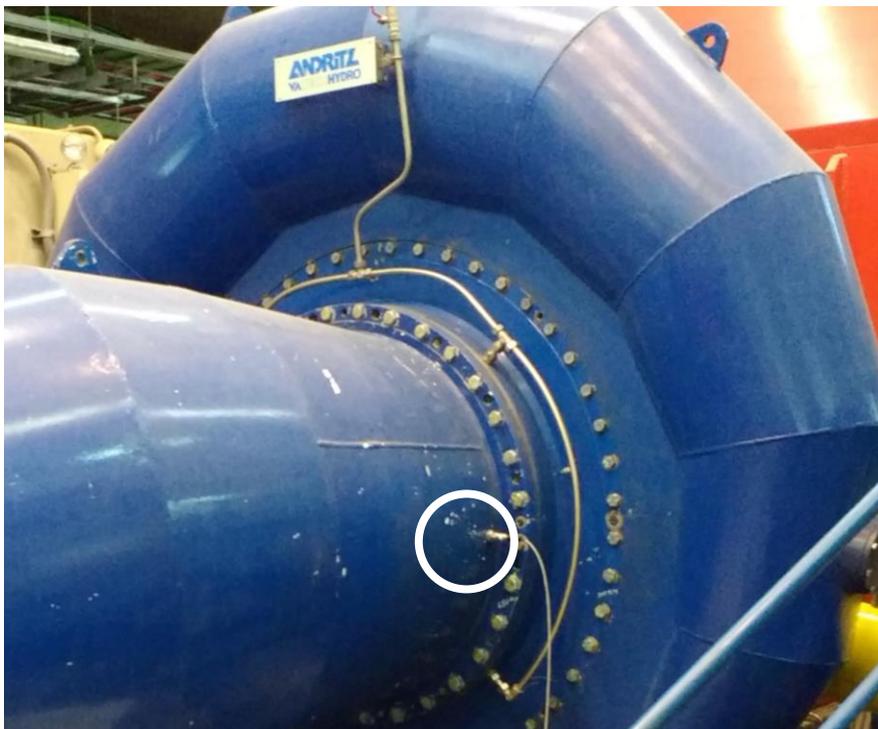


Figura 4-55 Instalación de acelerómetro en descarga de la turbina [Elaboración propia]

En la Tabla 4-8 se presentan la condiciones de operación de la central al momento de la prueba:

Tabla 4-8 Condiciones de operación Chiburgo 1 el 26 de Enero a las 14:00

Potencia bruta	9.0[MW]
Altura de carga	108,2[m]
Caudal turbinado	9.28[m ³ /s]

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por Colbún.

4.3.2 Resultados

4.3.2.1 Medición con acelerómetros

A continuación se observan los espectros en frecuencia en los diferentes puntos medidos con acelerómetros.



Figura 4-56 FFT descanso combinado dirección axial [Elaboración propia, extraído de software]

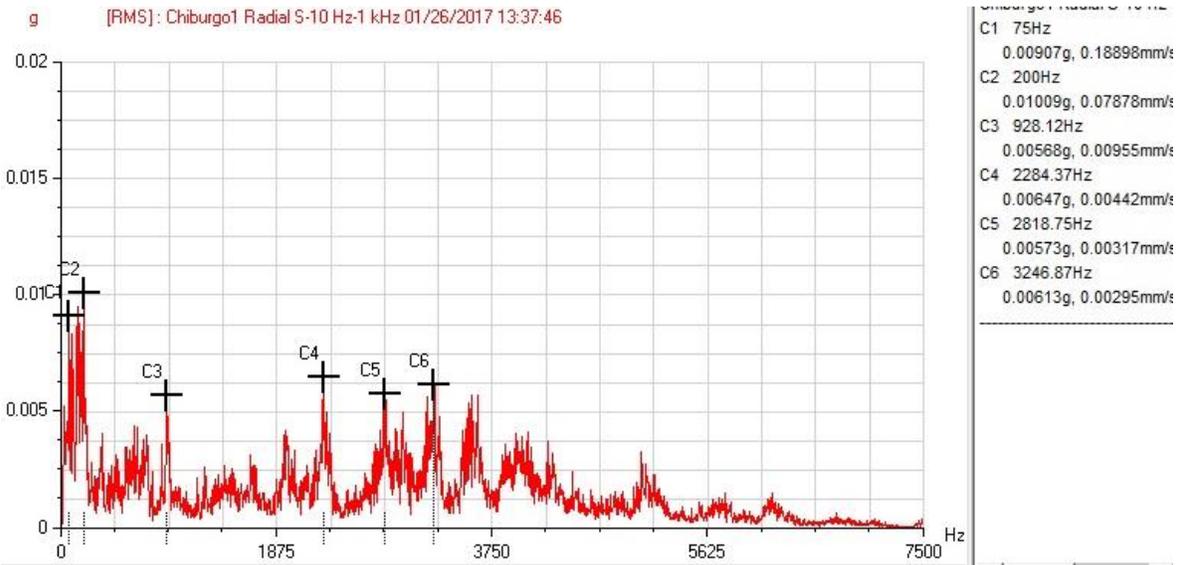


Figura 4-57 FFT descanso combinado dirección radial [Elaboración propia, extraído de software]

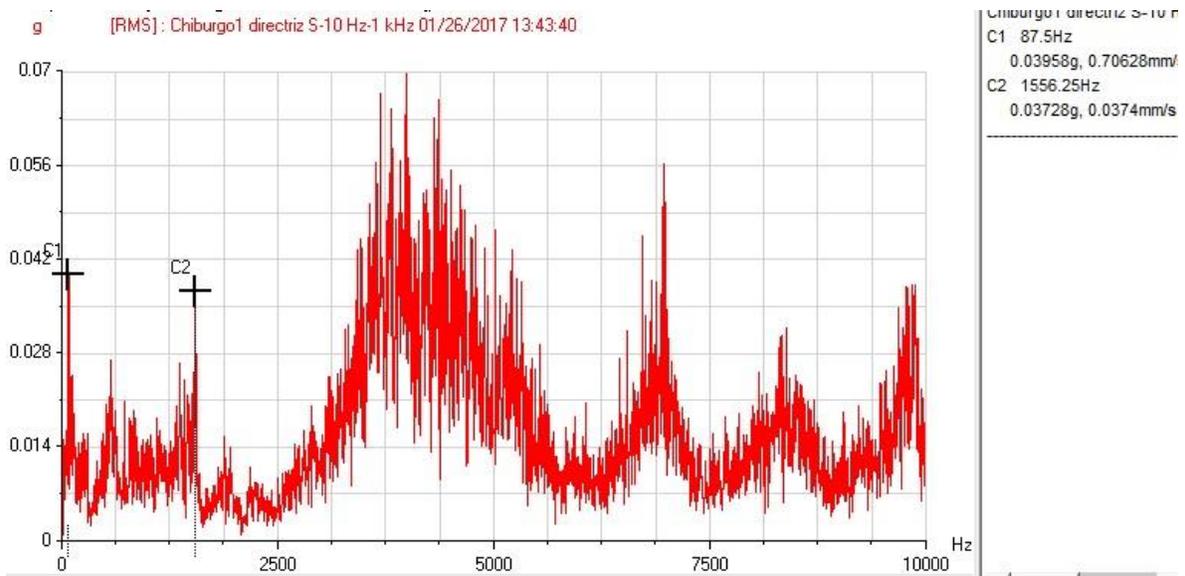


Figura 4-58 FFT Álabe directriz [Elaboración propia]

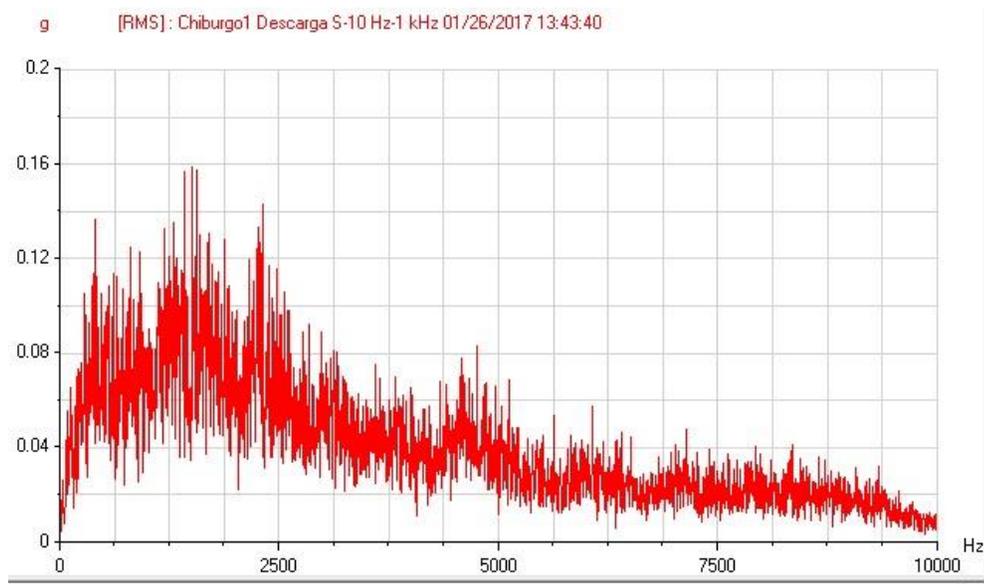


Figura 4-59 FFT Tubería de descarga [Elaboración propia]



Figura 4-60 FFT Descanso de turbina dirección radial

Tabla 4-9 Valores globales de aceleración en los puntos estudiados

	Descanso (Axial)	Descanso (Radial)	Álabe directriz	Descarga	Descanso turbina
Aceleración RMS	0.037	0.048	0.200	0.983	0.212
Aceleración Peak	0.101	0.565	0.565	3.810	0.516
Crest Factor	2.730	11.77	2.825	3.876	2.434
Skewness	0.192	0.231	0.598	0.788	0.321

Fuente: Elaboración propia.

Todos los valores de aceleración están en [g]

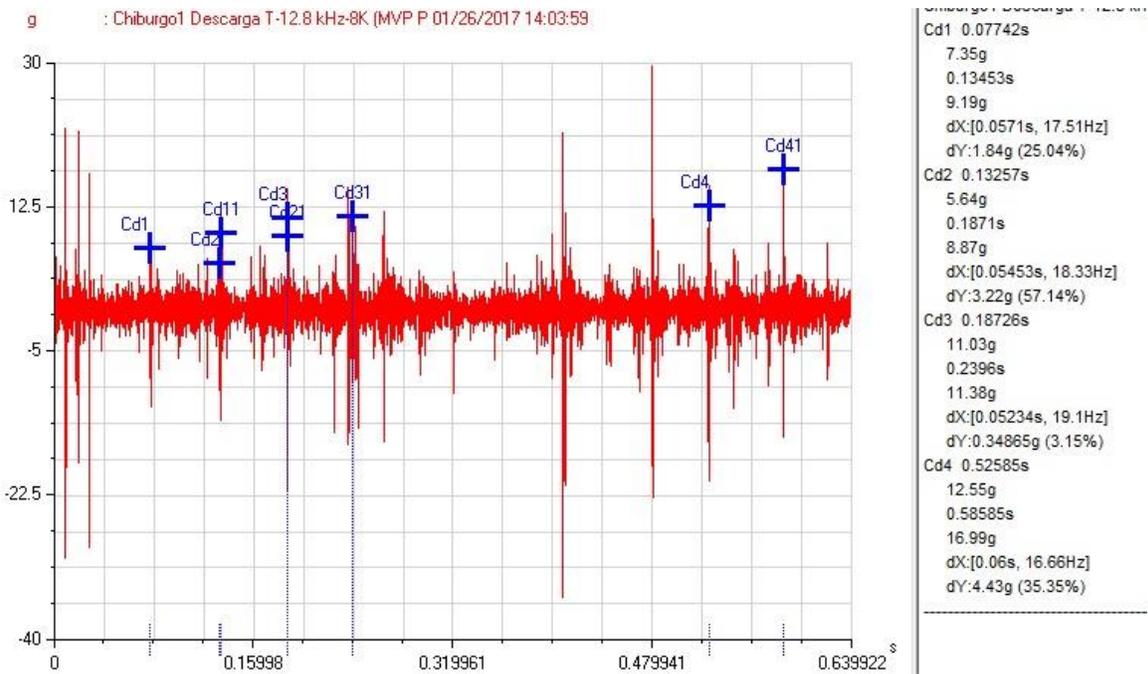


Figura 4-61 Forma de onda tubería de descarga con impactos marcados (valores amplificados x10) [Elaboración propia]

4.3.2.2 Emisiones acústicas

Las emisiones acústicas se midieron con un sensor instalado en el descanso de la turbina (Figura 4-54). Se programó la frecuencia de muestreo en 10MHz y el equipo mide 1024 datos por cada prueba.

En la Figura 4-62 se observa la forma de onda de un ensayo.

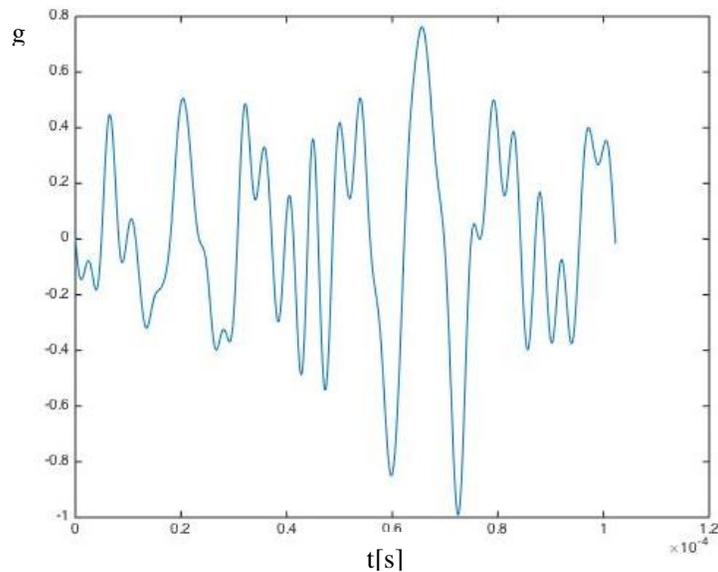


Figura 4-62 Forma de onda de emisiones acústicas [Elaboración propia]

En la Figura 4-63 se observa la FFT de la misma forma de onda, se ven 3 peaks marcados a 68kHz, 88kHz y 234kHz. La amplitud de estos es superior a la observada en el ensayo de laboratorio.

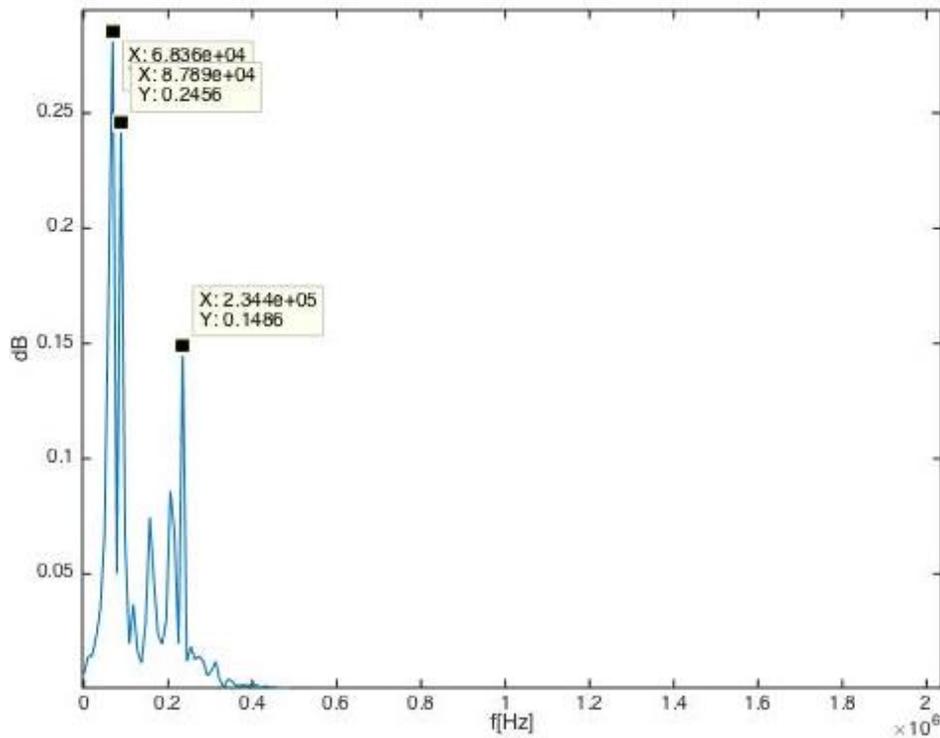


Figura 4-63 FFT en descanso de turbina [Elaboración propia]

4.3.3 Análisis y discusión

A partir de los espectros se pueden hacer los siguientes análisis:

En el descanso combinado dirección axial (Figura 4-56), se observan excitaciones puntuales pero ningún patrón de cavitación como los que se evidenciaron al hacer el ensayo en la turbina de laboratorio.

En el descanso combinado, en dirección radial (Figura 4-57) se ve un espectro con múltiples peaks, que si bien tienen amplitud baja pueden hacer relación a un problema mecánico y por eso el Crest factor se eleva en ese punto sobre 3. El valor de Skewness no es anormalmente elevado.

En la tubería de descarga (Figura 4-59) también se observa un Crest factor mayor, esto es por que la aceleración peak es muy alta, por las pulsaciones periódicas que se ven en la forma de onda (Figura 4-61). Sin embargo, el espectro no presenta ninguna componente marcada sino que excitaciones de banda ancha que podrían ser resultantes de turbulencia de antorcha en la descarga. Los impactos o pulsaciones mencionadas corresponden a impactos de vórtice con las paredes del tubo (Figura 4-61). Se puede ver que estas excitaciones presentan en ciertos puntos periodicidad con frecuencia baja, del orden de 17Hz, que corresponde a la frecuencia de rotación de la antorcha de cavitación en la descarga. En una turbina de menor velocidad de giro, la frecuencia puede ser del orden de 2 o 3Hz, y por eso por lo general se monitorea con sondas de presión [8], [18]. Este tipo de cavitación no produce daños por erosión sino que solamente por

vibraciones de baja frecuencia que afectan la estabilidad de operación y el balance. Es importante destacar la amplitud que tienen estas pulsaciones, llegando hasta 3[g] por lo que la antorcha no se debe dejar de monitorear cuando se monitorea una turbina.

En los álabes directrices (Figura 4-58) si se observa una componente de banda ancha a frecuencias entre 3000 y 5500Hz y la aceleración es mas importante llegando a 0.2g RMS, además un valor de Skewness mayor a los otros puntos. Esto podría indicar algún tipo de cavitación o desprendimiento de vórtices en los álabes. Sin embargo, es importante considerar que durante esta prueba el sistema de control de la turbina está permanentemente haciendo pequeños ajustes en la apertura de álabes por lo que el ruido de la señal se puede atribuir al movimiento de estos.

Se puede concluir que, salvo por lo detectado en el álabe directriz donde no se tiene certeza del origen de la excitación, no se evidencia cavitación en la turbina a partir de la calibración del método realizada en laboratorio. Esto concuerda con lo que se esperaba para esas condiciones de operación de acuerdo al personal de la planta.

Del análisis de emisiones acústicas (Figura 4-62) se puede confirmar lo deducido de los acelerómetros, de que no hay perturbaciones importantes. Los peaks detectados a alta frecuencia (234kHz) pueden corresponder a pequeñas irregularidades en el flujo. Es interesante notar que en el laboratorio, en situación de cavitación (Figura 4-35), se detectaba un peak a una frecuencia cercana de 224kHz. Esto puede ser una característica de este tipo de instalaciones o bien un problema no detectable con acelerómetros.

5 Discusiones

El análisis con emisiones acústicas resultó dificultoso por el tipo de equipo disponible para las pruebas realizadas. Sin embargo, los resultados son interesantes ya que directamente observando los espectros en frecuencia se detectan componentes que vienen de cavitación. Incorporar un equipo de emisiones acústicas en el sistema de control puede resultar igual o más efectivo que uno de vibraciones dado lo marcadas de las diferencias en los espectros, sin embargo requiere mayor estudio.

La cavitación por antorcha en la descarga no parece ser la más relevante por diversas razones: no tiene gran influencia erosiva, no genera daños a corto plazo. Es por ello que ese punto no es monitoreado en tiempo real usualmente en las centrales.

En el transcurso del trabajo se conversó en dos oportunidades el tema con jefes de mantención de dos centrales hidroeléctricas: Pacific Hidro en Rancagua y el Complejo Colbún en la XII Región.

En Pacific Hidro, como se trataba de centrales de menor envergadura, no se monitoreaba más que proximidad en los descansos hidrodinámicos. Sin embargo, en invierno cuando los caudales eran bajos y se evidenciaba cavitación (de manera cualitativa), se experimentaba inyectando aire a presión en el fluido y con este método operaban incluso bajo el límite mínimo recomendado por el fabricante, sin embargo al no estar instrumentadas las centrales era todo experimental. Para ese tipo de casos este estudio es relevante ya que permitiría respaldar las pruebas y optimizar los parámetros que se utilizan.

En Colbún, las centrales son monitoreadas en línea con un equipo de vibraciones y con sistemas que miden ruido y filtran frecuencias determinadas para detectar fenómenos de cavitación, además bajo ninguna circunstancia se permite operar fuera de los márgenes establecidos por el fabricante (aunque se tenga mejor rendimiento) ya que de lo contrario en caso de cualquier evento los seguros no cubren. Por eso mismo este estudio es relevante ya que de llegar a resultados favorables, se puede enviar una solicitud al fabricante con el detalle de las pruebas realizadas y pedir autorización para cambiar límites de operación, y poder sacar el máximo provecho de las condiciones existentes.

En el mismo proyecto se trabaja con un alumno de Ingeniería eléctrica quien evaluará la factibilidad de operar la unidad a diferentes RPM mediante un inversor de frecuencia. Sus resultados pueden ser considerados eventualmente para ampliar rangos de operación eficiente. Este fue el propósito principal del ensayo n°3 en laboratorio (Tabla 4-4), de donde se concluyó que la disminución de RPM implica, hasta cierto punto, mejoras en la operación. En cuanto al aumento de velocidad de giro, tiene que ser muy leve ya que si se aumenta mucho se produce una gran inestabilidad en el flujo y las condiciones empeoran notablemente. Este estudio está siendo llevado a cabo con apoyo de la empresa generadora Colbún S.A.

6 Conclusiones

El estudio en turbinas Francis, tanto en laboratorio como en central hidroeléctrica, se llevó a cabo satisfactoriamente, permitiendo obtener datos de vibraciones y emisiones acústicas en distintos puntos de las turbinas. La calibración previa de los equipos y el procesamiento de los datos exportados con software Matlab aseguran precisión de las mediciones presentadas.

El estudio comparativo en distintas condiciones de operación, como el que se realizó en la UFSM, permite identificar los episodios de cavitación sin requerir de análisis más profundos, basta comparar la aceleración global. Sin embargo cuando se trata de detectar cavitación a partir de una medida sin punto de referencia o sin cambiar las condiciones, se requiere un estudio más avanzado considerando distintos indicadores estadísticos o realizar test de impacto para conocer las frecuencias de resonancia de la instalación. De todos los que se analizaron se encontró que era eficiente analizar: aceleración global, análisis comparativo de espectros en frecuencia, identificación de las frecuencias naturales de la instalación mediante test de impacto y comparación de Skewness y Kurtosis de la señal. Esto resultó ser efectivo en la detección de anomalías de flujo.

Con los análisis realizados se pudieron identificar todos los episodios de cavitación evidenciados en la tubería de descarga, salvo un punto que se detectó únicamente mediante el análisis avanzado de vibraciones.

El análisis de Kurtosis, si bien no sirve como indicador para detectar el estado del flujo en un instante determinado, si permitió detectar incipientemente el paso a una zona de operación donde se produce cavitación. La aparición se detecta con un aumento de Kurtosis antes de un cambio notorio en la aceleración RMS e incluso antes de que se haga visible en la tubería de descarga, luego si se entra en una zona de mayor cavitación, se percibe el aumento en aceleración RMS y la Kurtosis disminuye. Esta herramienta resulta por lo tanto muy poderosa para definir márgenes seguros de operación, pensando eventualmente en un sistema de aprendizaje automático. Es importante destacar que el aumento de Kurtosis se produce antes que el aumento de aceleración global por lo tanto puede ser un parámetro de alarma más efectivo.

Con el estudio anterior se determinó satisfactoriamente la zona de operación segura de la turbina de laboratorio, tanto en velocidad de giro, que debe mantenerse menor a 400RPM como en apertura de álabes que debe mantenerse entre 100% y 50% exceptuando el punto de 60%. La apertura de 50% de álabes corresponde a 60% del caudal nominal.

La prueba realizada en la central Chiburgo de Colbún permitió comprobar que el método es aplicable a una central hidroeléctrica en escala real, pese a que no se hayan detectado anomalías importantes. Los puntos de medición dieron resultados significativos, salvo que la medición en álabe directriz es difícil por el control automático de estos. En la tubería de descarga se observaron pulsaciones de importante intensidad con frecuencia baja, lo que correspondería a un tipo de cavitación de antorcha.

Un estudio a distintas condiciones, como el realizado en el laboratorio, permitiría determinar los rangos seguros de operación de cualquier central.

El estudio con equipo de emisiones acústicas resultó ser muy interesante ya que permite ver inmediatamente componentes en el espectro que no son identificables con acelerómetros. El espectro permite detectar cavitación fácilmente y también es posible utilizarlo como parámetro para monitoreo en tiempo real. No es relevante muestrear con frecuencias superiores a 5MHz ya que no hay componentes a mayor frecuencia. Se detecta una componente similar en la turbina ensayada en laboratorio y en la central hidroeléctrica.

Los parámetros identificados permiten monitoreo en tiempo real en el sistema de control de la central, el operador puede tener información del flujo y no solo limitarse por los parámetros operacionales indicados por el fabricante. El método resulta ser entonces útil y para un próximo estudio se puede incorporar un monitoreo en línea desde el sistema de control de una central hidroeléctrica y monitorear su funcionamiento durante un periodo largo para probar en las épocas que se alcancen los límites de la instalación.

Bibliografía

- [1] «Informe de precio nudo,» Comision Nacional de Energía , 2015.
- [2] A. Lejeune y S. Hui , «Hydropower: a multi benefit solution for renewable energy,» *Compr Renew Energy*, vol. 6, pp. 15-47, 2012.
- [3] P. Kumar y R. Saini, «Study of cavitation on hydro turbines- A review,» vol. 14, pp. 374-383, 2010.
- [4] I. Suescun, Curso de centrales hidráulicas, capitulo 4, Universidad de Antioquia.
- [5] IEEE , «Guide for Applications of Plant Monitoring for Hydroelectric Facilities,» *IEEE Draft Standard* , nº D1.5, p. 1438, January 1999.
- [6] P. P. Gohil y R. saini, «Effect of temperature, suction head and flow velocity on cavitation in a Francis turbine of small hydro power plant,» *Energy*, vol. 93, pp. 613-624, 2015.
- [7] Á. Marín, Manual de manutencion mecánica, p. Cap 5.
- [8] X. Escaler , E. Egusquiza, M. Farhat, F. Avellan y M. Coussirat, «Detection of cavitation in hydraulic turbines,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, p. 983–1007, 2006.
- [9] C. Mataix, Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, 2da edicion ed., Ediciones del Castillo, 1986.
- [10] C. E. Brennen, «Chapter 6. Bubble dynamics, damage and noise,» de *Hydrodynamics of pumps*, Concepts NREC, 1994.
- [11] S. Dixon y C. Hall, Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, 7ª ed., 2014, pp. 361-468.
- [12] A. Mc Donald, R. Fox y R. Van Dewoistine, «Effects of swirling inlet flow on pressure recovery in conical diffusers,» *AIAA Journal*, vol. 9, nº 10, pp. 2014-2018, 1971.
- [13] R. P. Saini y P. P. Gohil, «Effect of temperature, suction head and flow velocity on cavitation in a Francis turbine of small hydro power plant,» vol. 93, pp. 613-624, 2015.
- [14] C. M. H. W. D. a. B. C. Martin, Cavitation inception in spool valves, vol. 103, ASME. J. Fluids Eng., 1981.
- [15] Y. Minakov, D. Platonov, A. Deterkev, A. Sentyabov y A. Zakharov, The analysis of unsteady flow structure and low frequency pressure pulsations in the high-head Francis turbines, vol. 53, International Journal of Heat and Fluid Flow, 2015, pp. 183-194.
- [16] Z. Zi gang, L. Shu-hong, L. De-min, Q. Da-quiring y W. Yu-lin, Numerical analyses of pressure fluctuations induced by interblade vortices in a model francis turbine, vol. 24,

Journal of Hydrodynamics, 2015, pp. 513-521.

- [17] X. Escaler, E. Egusquiza, M. Farhat y F. Avellan, «Cavitation erosion prediction in hydro turbines from onboard vibrations,» 29 June 2004.
- [18] X. Escaler, J. V. Ekanger, H. H. Francke, M. Kjeldsen y T. K. Nielsen, «Detection of Draft Tube surge and Erosive Blade Cavitation in a Full-Scale Francis Turbine,» *Journal of Fluids Engineering*, vol. 137, January 2015.
- [19] B. Bajik, «Methods for vibro-acoustic diagnosis of turbine cavitation,» n° 41, pp. 87-96, 2003.
- [20] J. Gonzalez, «DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CONDICIÓN MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN CENTRAL MICROHIDRÁULICA,» Memoria de título, Universidad de Chile, Santiago.
- [21] N. Sawalhi y R. B. Randall, «The application of spectral kurtosis to bearing diagnostics,» *Acoustics*, pp. 393-398, 2004.
- [22] J. Antoni y , «Fast Computation of the Kurtogram for the Detection of Transient Faults,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, n° 1, pp. 108-124, January 2007.
- [23] Y. Wang, H. Zhengjia y Z. Yanyang, «A comparative study on the local mean decomposition and empirical mode decomposition and their applications to rotating machinery health diagnosis,» *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 132, April 2010.
- [24] Super Intendencia de Combustibles, «Coordinador eléctrico SIC,» [En línea]. Available: <https://infotecnica-sic.coordinadorelectrico.cl/instalaciones/?eid=0&type=43>. [Último acceso: 03 Febrero 2017].
- [25] R. B. Randall, *Vibration-based condition Monitoring*, Wiley, 2011.

Anexos

I- Ficha técnica de acelerómetros utilizados.

HS-100T Series Vibration Sensor

3 Pin MS Connector, 100mV/g Industrial Accelerometer with Temperature Sensor



Typical Applications

- Proven use in vibration monitoring for offline applications using commercially available data collectors and online monitoring systems in the fields of Building Services, Civil Engineering, Paper and Pulp, Mining, Metals Manufacture, Utilities, Automotive, Water and Waste Treatment, Pharmaceutical, Aerospace, etc.
- **Protecting...**
Fans, Motors, Pumps, Compressors, Centrifuges, Conveyers, Air Handlers, Gearboxes, Rolls, Dryers, Presses, Cooling, HVAC, Spindles, Machine Tooling, Process Equipment and many more.

Technical Performance

Mounted Base Resonance	22 kHz (nominal)
Sensitivity	100 mV/g $\pm 10\%$ Nominal 80 Hz at 22 °C
Frequency Response	2 Hz to 10 kHz $\pm 5\%$ 0.8 Hz to 15 kHz ± 3 dB
Isolation	Base isolated
Measurement Range	± 80 g
Temperature	10 mV/°C Standard 100°C, Option 140°C
Transverse Sensitivity	Less than 5%

Electrical

Electrical Noise	0.1 mg max
Current Range	0.5 mA to 8 mA
Bias Voltage	10 - 12 Volts DC
Settling Time	2 seconds
Output Impedance	200 Ohms max.
Case Isolation	$>10^8$ Ohms at 500 Volts

Environmental

Operating Temperature Range	-55 to 140 °C
Sealing	IP67
Maximum Shock	5000 g
Emissions	EN61000-6-4:2001
Immunity	EN61000-6-2:1999

Mechanical

Case Material	Stainless Steel
Sensing Element/Construction	PZT/Compression
Mounting Torque	8 Nm
Weight	110 gms (nom)
Maximum Cable length	1000 metres
Mating Connector	HS -AA005
Mounting Threads	See 'How to order' table
Options	Integral cable, filters, various connector assemblies, other sensitivities



Tel: +44(0) 845 680 1957
 Fax: +44(0) 845 680 1958
 Email: sales@hansfordsensors.com
 Web: www.hansfordsensors.com

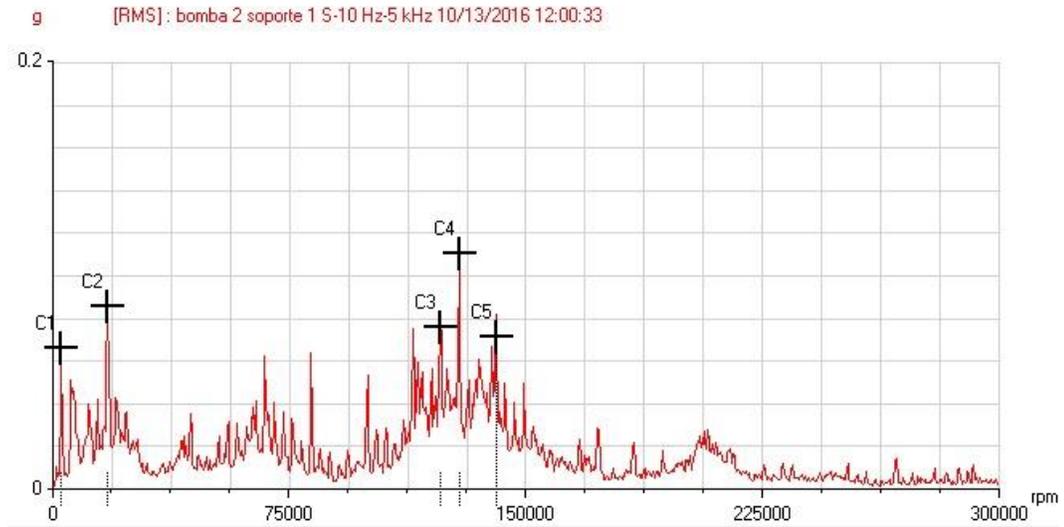
PRODUCT DATA

II- Espectro de calibración en shaker



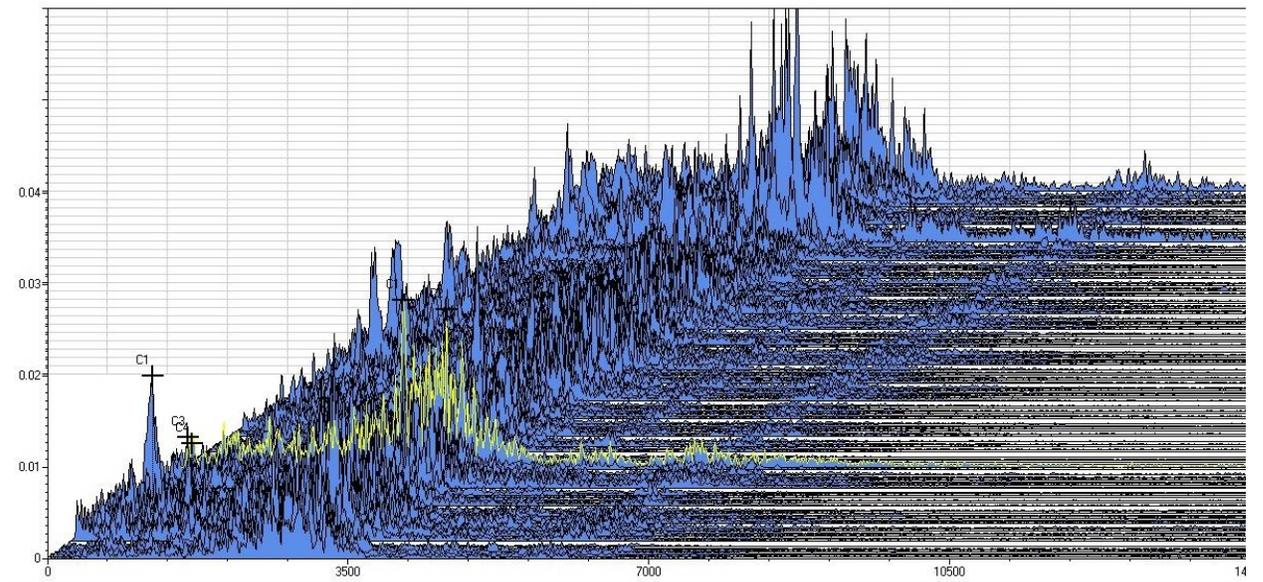
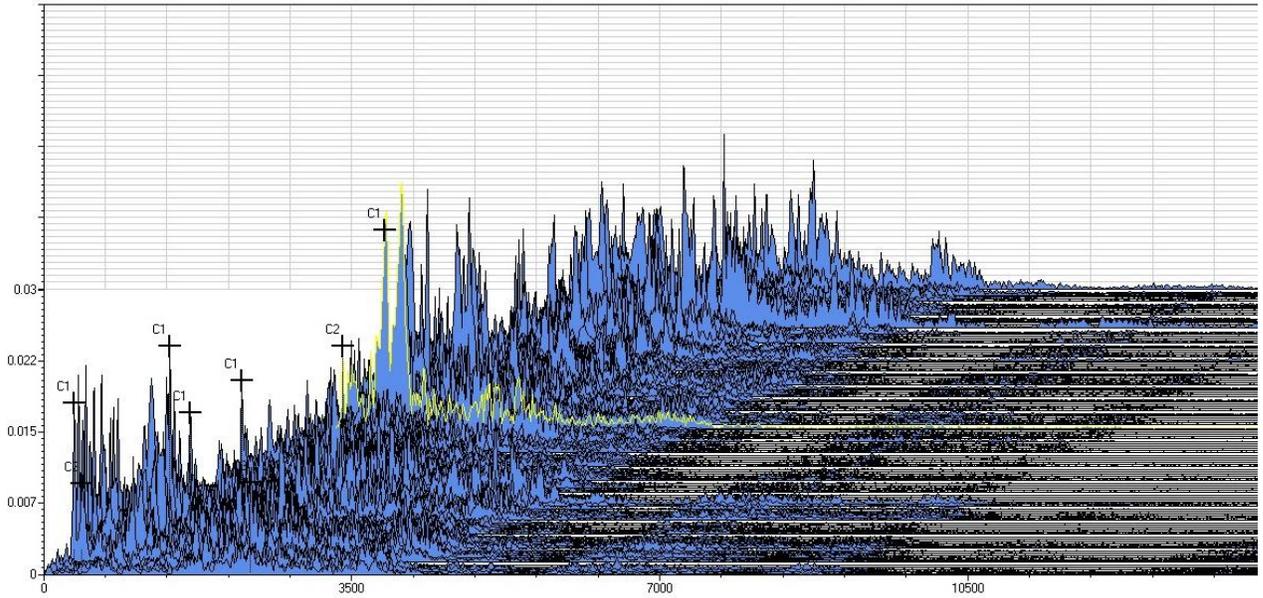
Fuente: Elaboración propia, extraído de software de procesamiento

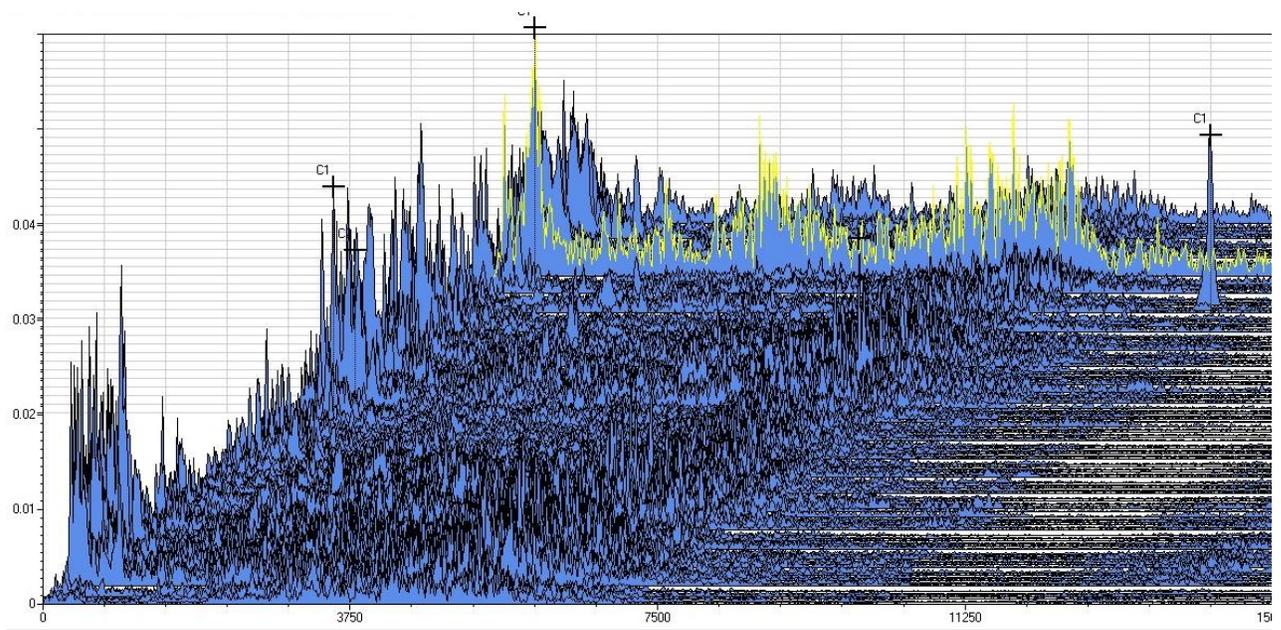
III- Espectro de prueba en bombas



Fuente: Elaboración propia, extraído de software de procesamiento.

IV- Espectros en cascada de álabes directrices, descarga y descanso en dirección axial con marcas en frecuencias características.





Fuente: Elaboración propia, extraído de software de procesamiento