

# 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 UFSSM .....	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