UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

PROYECTO TÉCNICO

"ADQUISICIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS Y VIBRACIONALES PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MULTIETAPA DE EJE VERTICAL"

"Acoustic and vibrational signals acquisition for fault diagnosis in a multistage vertical axis centrifugal pump"

Autores:

Juan Carlos Calderón Malla Felipe Israel Montalván Pulla

Tutor:

Ing. René Vinicio Sánchez, PhD.

Cuenca – Ecuador

2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Juan Carlos Calderón Malla con documento de identificación N° 0105751911 y Felipe Israel Montalván Pulla con documento de identificación N° 0106772197 manifestamos nuestra voluntad, y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: "ADQUISICIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS Y VIBRACIONALES PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MULTIETAPA DE EJE VERTICAL", mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores, nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio de 2019

Juan Carlos Calderón Malla

C.I.: 0105751911

Hater -

Felipe Israel Montalván Pulla

C.I.: 0106772197

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "ADQUISICIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS Y VIBRACIONALES PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MULTIETAPA DE EJE VERTICAL", realizado por Juan Carlos Calderón Malla y Felipe Israel Montalván Pulla, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio de 2019

Ing. René Vinicio Sánchez, Ph.D. C.I.: 0103409587

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Juan Carlos Calderón Malla con documento de identificación N° 0105751911 y Felipe Israel Montalván Pulla con documento de identificación N° 0106772197, autores del trabajo de titulación: **"ADQUISICIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS Y VIBRACIONALES PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MULTIETAPA DE EJE VERTICAL"**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, julio del 2019

Juan Carlos Calderón Malla C.I.: 0105751911

totos -Felipe Israel Montalván Pulla

C.I.: 0106772197

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis queridos padres Manuel Calderón y Margot Malla por ser los pilares fundamentales en mi vida y en mi formación académica, a mi amada esposa Olga Priscila por su apoyo incondicional, a mis queridos hermanos David y Jefferson y a toda mi apreciada familia por haber sido de una u otra manera mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional como personal.

Juan Carlos Calderón Malla

DEDICATORIA

Dedicado a todas las personas que confiaron en mí, para culminar mi carrera, en especial a mi madre, Susana, quien ha sido pilar fundamental en mi vida para lograr cumplir mis metas. A mi hermano, Santiago, que siempre me apoyo y creyó que era capaz de lograr lo que me propusiera.

Felipe Israel Montalván Pulla

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a María Auxiliadora por las bendiciones y todas las manifestaciones de amor presentes en mi vida.

A mis queridos padres que gracias a su ayuda, esfuerzo y confianza en toda mi carrera y a lo largo de mi vida me han ayudado a alcanzar mis metas y a cumplir mis sueños.

A mi querida esposa por su comprensión y apoyo incondicional durante de toda mi carrera universitaria.

A mis hermanos que siempre me apoyaron en todo momento y por haber confiado siempre en mí.

A mi amigo y compañero Felipe Montalván por su amistad brindada y por todo el esfuerzo y dedicación para la realización de este trabajo.

A mi director de proyecto, Ing. René Vinicio Sánchez, quien desde un principio supo impulsar y dar las facilidades necesarias para la realización de este proyecto. A los miembros del GIDTEC, Jean Carlo Macancela, Édison Pacheco, David Chingal, Holger Llivicura, Franco Cajas, Cristian Torres y Ana Calle; quienes a lo largo de este tiempo siempre colaboraron para el éxito de este proyecto.

A mis maestros que con esfuerzo y perseverancia brindaron su apoyo y conocimientos para forjar el apendizaje.

A los ingenieros laboratoristas y Mauricio Villacis, Carlos Zhigue y Esteban Tobar que siempre ayudaron a resolver cualquier inconveniente durante el desarrollo del proyecto, brindando su amistad y conocimientos.

A la Universidad Politecnica Salesiana por la formación académica y humana durante todos los años de estudio.

Gracias Salesiana.

Juan Carlos Calderón Malla

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermano que siempre me han motivado a seguir adelante, a superar obstáculos, y con su apoyo haber logrado cumplir mis metas y mi tesis. A mi enamorada, quien me ha acompañado y alentado para lograr cumplir uno de mis objetivos que es la obtención de mi título profesional. De igual forma, quiero agradecer a la Universidad Politécnica Salesiana que durante estos años formó parte de mi vida estudiantil como fuente de sabiduría, para moldearme con valores y conocimientos.

Doy las gracias al grupo de investigación GIDTEC, en especial al Ingeniero Vinicio Sánchez y a mi compañero Juan Carlos Calderón, quienes han tenido paciencia en todo el proceso de tesis por mis varios errores y desacuerdos, pero al final, siempre nos entendimos y nos comunicamos de la mejor manera.

Gracias a Mauricio Villacis, Carlos Zhigue y Esteban Tobar por su amabilidad, anécdotas paciencia para enseñar y apoyo.

Muchas gracias a todos.

Gracias Salesiana.

Felipe Israel Montalván Pulla

RESUMEN

Las bombas son fundamentales en las diferentes industrias por lo cual, el diagnóstico de fallos temprano y adecuado es fundamental para garantizar una actividad continua de una planta industrial. En este trabajo se presenta el proceso de adquisición de señales acústicas y vibracionales para el diagnóstico de fallos en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical simulando fallos en elementos mecánicos críticos con distintas severidades esto con la finalidad de brindar un aporte para el estudio de diagnóstico de fallos en máquinas hidraúlicas mediante el análisis de señales para el monitoreo de condición.

El capítulo 1 presenta una introducción al proyecto técnico, el problema, los antecedentes, el alcance y los objetivos planteados para el trabajo de titulación. Se presenta también, la importancia del monitoreo de señales acústicas y de vibración para la detección de fallos en bombas centrífugas multietapa de eje vertical.

El Capítulo 2 establece el marco teórico de trabajo donde se presentan temas de interés, como el mantenimiento basado en la condición, el monitoreo de la condición y sus técnicas principales, tales como: monitoreo de vibración y monitoreo de señal acústica. Para estas dos técnicas, se profundiza el estudio y la investigación sobre el diseño y construcción de fallos en bombas centrífugas, así como el principio de operación y la obtención de curvas para el diseño y construcción de un sistema de bombeo.

El Capítulo 3 presenta el desarrollo experimental del trabajo en el que se detalla la metodología utilizada para la adquisición de señales acústicas y de vibración, abarca temas como: la instalación de sensores en lugares estratégicos, la configuración del sistema de adquisición, el procedimiento para validar las señales y las diferentes combinaciones de fallos para la adquisición de señales.

El Capítulo 4 presenta el desarrollo y la validación de una guía práctica que es parte de los resultados del proyecto, donde se presenta una introducción al análisis de señales de vibración para la detección de fallas de cavitación en la bomba centrífuga vertical de etapas múltiples utilizada en este proyecto. La validación de la práctica se llevó a cabo con estudiantes y egresados de la carrera de ingeniería mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, logrando establecer un material de apoyo para el aprendizaje del mantenimiento basado en la condición.

ABSTRACT

Pumps are essential in different industries so early and proper fault diagnosis is essential to ensure continuous operation of an industrial plant. This work presents the process of acquisition of acoustic and vibrational signals for the diagnosis of failures in a multistage centrifugal pump of vertical axis simulating failures in critical mechanical elements with different severities this with the purpose of providing a contribution to the study of failure diagnosis in hydraulic machines through the analysis of signals for condition monitoring.

Chapter 1 presents an introduction to the technical project, the problem, the background, the scope and the objectives set for the degree work. It also shows the importance of monitoring acoustic and vibration signals for the detection of faults in vertical axis multistage centrifugal pumps.

Chapter 2 sets out the theoretical framework for issues of interest, such as condition-based maintenance, condition monitoring and its main techniques, such as vibration monitoring and acoustic signal monitoring. For these two techniques, the study and research on the design and construction of faults in centrifugal pumps is deepened, as well as the principle of operation and the obtaining of curves for the design and construction of a pumping system.

Chapter 3 presents the experimental development of the work in which the methodology used for the acquisition of acoustic and vibration signals is detailed, covering topics such as: the installation of sensors in strategic locations, the configuration of the acquisition system, the procedure for validating the signals and the different combinations of faults for the acquisition of signals.

Chapter 4 presents the development and validation of a practical guide that is part of the project results, which presents an introduction to vibration signal analysis for cavitation fault detection in the vertical multistage centrifugal pump used in this project. The validation of the practice was carried out with students and graduates of the mechanical engineering career of the Universidad Politecnica Salesiana, managing to establish a support material for learning condition-based maintenance.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CESIÓ	N D	E DERECHOS DE AUTOR	I
CERTI	FIC	ACIÓN	II
DECLA	ARA	ГORIA DE RESPONSABILIDAD	. III
DEDIC	CATC	DRIA	IV
DEDIC	CATC	DRIA	V
AGRAI	DEC	IMIENTOS	VI
AGRAI	DEC	IMIENTOS	. VII
RESUN	IEN	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	VIII
ABSTR	АСТ	*	IX
ÍNDIC	E DI	E CONTENIDOS	X
ÍNDIC	E DI	E FIGURAS	XIV
ÍNDIC	E DI	E TABLAS	XVI
1. CA	PÍTI	ULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1.	PL	ANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1.	1.	Antecedentes	1
1.1.	2.	Importancia y alcances	4
1.1.	.3.	Delimitación	5
1.2.	OB	JETIVOS	6
1.2.	1.	Objetivo general	6
1.2.	2.	Objetivos específicos	6
2. CA	PÍT	ULO 2. MARCO TEÓRICO	7
2.1.	Ter	minología del mantenimiento	7
2.2.	Mo	nitoreo de la Condición	8
2.3.	Mai	ntenimiento basado en la condición	8
2.4.	Mo	nitoreo de las vibraciones en bombas	9
2.5.	Señ	ales de vibración	9
2.6.	Niv	eles de vibración en máquinas rotativas	10
2.6.	1.	Ventajas y limitaciones sobre el monitoreo de las señales de vibración	10
2.6.	2.	Estudios de vibración en bombas centrífugas	10
2.6.	.3.	Representación gráfica de la onda	11
2.7.	Señ	ales acústicas	12
2.8.	Mo	nitoreo de señales acústicas	13
2.8.	1.	Estudios de señales acústicas en bombas centrífugas	13

2.8.2.	Ventajas y limitaciones del monitoreo de las señales acústicas	13
2.8.3.	Monitoreo de señales acústicas en bombas	13
2.8.4.	Fuentes acústicas en bombas centrífugas	14
- Fu	entes hidráulicas	14
2.8.5.	Acústica de bombas causada por cavitación	14
2.8.6.	Propagación de la acústica en el interior de las bombas	15
2.9. Bo	ombas Hidraúlicas	15
2.9.1.	Clasificación general de las bombas	15
2.9.2.	Funcionamiento de una bomba centrífuga	17
2.9.3.	Terminología básica de un sistema de bombeo	17
2.9.4.	Cavitación y golpe de ariete en una bomba	19
2.9.5.	Altura de Succión Neta Positiva – disponible	
2.9.6.	Altura Neta Positiva en la Succión – requerida <i>(NPSHr)</i>	
2.9.7.	Bombas centrífugas multietapa de eje vertical	
2.9.8.	Descripción de las partes	
2.9.9.	Funcionamiento de una bomba centrífuga multietapa vertical	
2.9.10.	Caracterización de la bomba centrífuga multietapa vertical modelo	
3SV100	GE4F20	
2.9.11.	Problemas comunes en bombas centrífugas	
2.10.	Cavitación	
2.10.1.	Tipos de Cavitación	
2.10.2.	Síntomas de la cavitación	
2.10.3.	Regímenes de flujo de cavitación	
2.10.4.	Efectos que produce la cavitación	31
2.10.5.	Disminución del rendimeinto de la bomba	
2.10.6.	Erosión de los componentes de la bomba	
2.10.7.	La cavitación y la importancia del BEP	
2.10.8.	Monitoreo de la cavitación en bombas centrífugas	
2.10.9.	Métodos de prevención de cavitación	
2.11.	Fallos en bombas centrífugas	
2.11.1.	Técnicas para identificar potenciales fallos	
2.11.2.	Árbol de fallos	
2.11.3.	Análisis del árbol de fallos	
2.11.4.	Análisis de modo efecto de falla	
2.11.5. multieta	Calificación de severidad, ocurrencia y detección para una bomba cen apa vertical	trífuga 38

2.12	2. 1	Fallos en sello mecánico	. 41
2.	2.12.1. Revisión bibliográfica en construcción de fallos en el sello mecánico 4		
2.12.2. Análisis causa-raíz para simular fallo en sello mecánico		Análisis causa-raíz para simular fallo en sello mecánico	. 41
2.	.12.3.	Fallos propuestos en sello mecánico	. 44
2.13	3. I	Fallos en impulsor	. 44
2.	.13.1.	Revisión bibliográfica sobre construcción de fallos en impulsor	. 44
2.	.13.2.	Análisis causa-raíz para simular fallo en el impulsor	. 45
2.	.13.3.	Niveles de severidad por picadura en la entrada de los alabes del impulsor.	. 50
2.	.13.4.	Fallos propuestos en la entrada del impulsor	. 51
2.	.13.5.	Niveles de severidad por picadura en la salida del álabe	. 52
2.	.13.6.	Fallos propuestos en la salida del impulsor	. 53
2.	.13.7.	Niveles de severidad por bloqueo en los canales del impulsor	. 55
2.	.13.8.	Severidad por desbalanceo del impulsor	. 58
2.14	ł. I	Fallos en rodamientos	. 60
2.	.14.1.	Revisión bibliográfica en construcción de fallos en rodamientos	. 60
2.	.14.2.	Análisis causa-raíz de principales fallos en rodamientos	. 60
2.	.14.3.	Severidad para fallos en pista interna	. 68
2.14.4. Severidad para fallos en pista externa		. 70	
2.	.14.5.	Severidad para fallos en elemento rodante	. 72
2.15	5. 5	Simulacion del estado de cavitación	. 74
2.	.15.1.	Revisión bibliográfica en inducción de cavitación	. 74
2.	.15.2.	Analisis causa-raiz para cavitación	. 74
2.	.15.3.	Propuesta para simular el estado de cavitación	. 78
2.16	5. I	Instrumentación y condiciones de operación	. 79
3. C	ΑΡΊΤ	ULO 3 - EXPERIMENTACIÓN	84
3.1.	Est	tación de bombeo	. 84
3.2.	Pro	oceso experimental	. 85
3.	.2.1.	Puesta a punto de la estación de bombeo	. 85
3.	.2.2.	Conexión y ubicación de sensores	. 86
3.3.	Ac	ondicionamiento del programa de adquición de datos (LabVIEW)	. 89
3.4.	Со	ndiciones de operación	. 89
3.5.	Lír	nea base	. 90
3.6.	Esj	pectros de las señales de vibración	. 90
3.	.6.1.	Espectro de la señal de cavitación	. 91
3.	.6.2.	Picadura mixta espectro de vibración	. 92
3.	.6.3.	Desbalanceo espectro de vibración	. 93

3.6.	4. Picadura externa espectro de vibración		
3.6.	5. Bloqueo espectro de vibración		
3.6.	6. Multifallo espectro de vibración		
3.7.	Señales acústicas		
3.7.	1. Cavitación espectro acústico		
3.7.	2. Picadura mixta espectro acústico		
3.7.	3. Desbalanceo espectro acústico		
3.7.	4. Picadura externa espectro acústico		
3.7.	5. Bloqueo espectro acústico		
3.7.	6. Multifallo espectro acústico		
3.8.	Comparación entre las señales de vibración y acústicas		
4. CA	PÍTULO 4 - GUÍA DE PRÁCTICA	104	
4.1.	Consulta bibliográfica		
4.2.	Requerimientos para la guía de práctica		
4.3.	4.3. Elaboración de la guía de práctica10		
4.4.	Revisión de la guía de práctica		
4.5.	Ejecución de la guía de práctica		
4.6.	Calificación de la guía de práctica		
4.7.	Validación de guía de práctica		
CONC	LUSIONES	108	
RECON	MENDACIONES	108	
TRABA	TRABAJOS FUTUROS1		
REFEF	REFERENCIAS11		
ANEXOS			

ÍNDICE DE FIGURAS

Tigura 1. Domba centinuga multetapa vertical, modelo 55 v 10014120, matea Obulus	.)
Figura 2. Clasificación del mantenimiento. Fuente: Norma UNE – EN 13306	.7
Figura 3. Ondas con diferente amplitud en el dominio del tiempo	11
Figura 4. Periodo de onda [23]	12
Figura 5. Clasificación general de las bombas	16
Figura 6. Partes principales de una bomba centrífuga	17
Figura 7. Alturas para un sitema de bombeo	19
Figura 8. Determinación de la altura de aspiración de una bomba	20
Figura 9. Curva NPSHd	21
Figura 10. Curva NPSHr	22
Figura 11. Bomba Centrífuga multietapa eje vertical	22
Figura 12. Esquema bomba centrífuga multietapa [39]	23
Figura 13. Impulsor cerrado. Bomba multietapa	25
Figura 14. Sello mecánico	25
Figura 15. Principio de funcionamiento de una bomba centrífuga multietapa vertical	26
Figura 16. Principio de funcionamiento de una bomba centrífuga multietapa vertical –	
descarga de flujo	27
Figura 17. Etapas de implosión de una burbuja por cavitación [43]	29
Figura 18. Síntomas de cavitación [46]	30
Figura 19. Disminución brusca de las curvas caraterísticas por el efecto de la cavitación en	ì
una bomba centrífuga [49]	32
Figura 20. Detalle del punto de máxima eficiencia de una curva caudal – rendimiento	33
Figura 21. Símbolos de conectores lógicos (izquierdo) y símbolos de eventos (derecha)	36
Figura 22. Análisis del árbol de fallos para la bomba centrífuga multietapa vertical	37
Figura 23. Funciones de cada componente del sello mecánico	41
Figura 24. Diagrama Ishikawa para el sello mecánico	42
Figura 25. Dimensiones del impulsor	45
Figura 26. Diagrama Ishikawa para el impulsor	46
Figura 27. Evolución del fallo por picadura en la entrada de un solo álabe	50
Figura 28. Evolución del fallo por picadura en la salida de un álabe	53
Figura 29. Evolución del fallo por bloqueo del impulsor	56
Figura 30. Evolución del fallo por desbalanceo de la cubierta frontal	58
Figura 31. Rodamiento 1205 para la experimentación	60
Figura 32. Spalling v pitting [68]	61
Figura 33. Diagrama Ishikawa para fallos en rodamiento	62
Figura 34. Evolución del fallo en la pista interna	68
Figura 35 Evolución del fallo en la pista externa	71
Figura 36. Evolución del fallo en elementos rodantes	73
Figura 37 Diagrama Ishikawa de varias causas que llevan a la cavitación en la entrada y	, 5
salida de la bomba	75
Figura 38 Curva altura-caudal (a) curva-rendimiento caudal (b)	78
Figura 39. Sistema de bombeo planta $A = 1$	78
Figure 40 Curva H-NPSHd	79
Figura 41. Diagrama de instrumentación y proceso (P&ID), según la norma ISA-S5.4	84

Figura	42. Disposición de la estación de bombeo	85
Figura	43. Proceso experimental para señales acústicas y de vibración	85
Figura	44. Secuencia de la conexión real del sistema de adquisión de sañales acústicas	86
Figura	45. Secuencia de la conexión real del sistema de adquisión de sañales de vibración	87
Figura	46. Ubicación sensores de vibración	88
Figura	47. Ubicación de micrófonos	88
Figura	48. Interfaz gráfica del programa para la adquisición de señales acústicas y de	
vibracio	ón	89
Figura	49. Curva motriz y curva de rendimiento	90
Figura	50. Frecuencia de paso de álabes y armónicos	90
Figura	51. Espectro de vibración 0-1000Hz, condición normal versus cavitación	91
Figura	52. Espectro de vibración 350-800Hz, condición normal versus cavitación	91
Figura	53. Espectro de vibración 0-1000Hz, condición normal versus mixto	92
Figura	54. Espectro de vibración 350-800Hz, condición normal versus mixto	92
Figura	55. Espectro de vibración 0-1000Hz, condición normal versus desbalanceo	93
Figura	56. Espectro de vibración 350-800Hz, condición normal versus desbalanceo	93
Figura	57. Espectro de vibración 0-1000Hz, condición normal versus picadura externa	94
Figura	58. Espectro de vibración 350-800Hz, condición normal versus picadura externa	94
Figura	59. Espectro de vibración 0-1000Hz, condición normal versus bloqueo	95
Figura	60. Espectro de vibración 350-800Hz, condición normal versus bloqueo	95
Figura	61. Espectro de vibración 0-1000Hz, condición normal versus multifallo	96
Figura	62. Espectro de vibración 350-800Hz, condición normal versus multifallo	96
Figura	63. Espectro acústico 0-1000Hz, condición normal versus cavitación	97
Figura	64. Espectro acústico 270-430Hz, condición normal versus cavitación	97
Figura	65. Espectro acústico 0-1000Hz, condición normal versus mixto	98
Figura	66. Espectro acústico 270-430Hz, condición normal versus mixto	98
Figura	67. Señal acústica 0-1000Hz, condición normal versus desbalanceo	99
Figura	68. Señal acústica 270-430Hz, condición normal versus desbalanceo	99
Figura	69. Señal acústica 0-1000Hz, condición normal versus picadura externa1	00
Figura	70. Señal acústica 270-430Hz, condición normal versus picadura externa1	00
Figura	71. Señal de acústica 0-1000Hz, condición normal versus bloqueo1	01
Figura	72. Señal de acústica 270-430 Hz, condición normal versus bloqueo1	01
Figura	73. Señal de acústica 0-1000Hz, condición normal versus multifallo1	02
Figura	74. Señal de acústica 270-430Hz, condición normal versus multifallo1	02
Figura	75. Señales de vibración de todos los fallos simulados1	03
Figura	76. Señales acústicas de todos los fallos simulados1	03
Figura	77. Diagrama de flujo para validar la guía de práctica1	04
Figura	78. Resultados para validación de la guía de práctica1	07

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proyectos de titulación culminados y en desarrollo en el GIDTEC	2
Tabla 2. Ventajas y limitaciones del monitoreo de las señales acústicas [13]	13
Tabla 3. Procesos hidrodinámicos causales de ruido por cavitación [32]	15
Tabla 4. Terminología básica de las bombas centrífugas [35]	18
Tabla 5. Terminología de alturas para un sistema de bombeo	19
Tabla 6. Partes principales de una bomba centrífuga multietapa vertical	24
Tabla 7. Significado de cada dígito del modelo de la bomba 3SV10GE4F20	27
Tabla 8. Principales datos técnicos de la bomba multietapa vertical 3SV10GE4F20	28
Tabla 9. Métodos de ingeniería para la detección de la cavitación	34
Tabla 10. Guía para calificar la severidad [51]	39
Tabla 11. Guía para calificar la ocurrencia [51]	39
Tabla 12. Guía para calificar la detección [51]	39
Tabla 13. Análisis de FMEA para la bomba centrifuga multietapa vertical	40
Tabla 14. Revisión bibliográfica de fallos en sellos mecánicos	43
Tabla 15. Fallos propuestos en sello mecánico por grieta y rotura	44
Tabla 16. Revisión bibliográfica de fallos en impulsores	47
Tabla 17. Severidad de la picadura en la entrada del álabe	50
Tabla 18. Fallos en impulsor – erosión por cavitación	51
Tabla 19. Severidad de la picadura en la salida del álabe	53
Tabla 20. Fallos en impulsor - erosión por cavitación	54
Tabla 21. Severidad del bloqueo en los canales del impulsor	55
Tabla 22. Fallos en impulsor - condición de bloqueo	56
Tabla 23. Severidad para desbalanceo de la cubierta frontal del impulsor	58
Tabla 24. Fallo propuesto por desbalanceo como resultado de la erosión por cavitación.	59
Tabla 25. Revisión bibliográfica de fallos inducidos en rodamientos de bolas	63
Tabla 26. Severidad para fallos de pista interna del rodamiento	68
Tabla 27. Fallos propuestos para pista interna	69
Tabla 28. Severidad para fallo de pista externa del rodamiento	70
Tabla 29. Fallos propuestos para pista externa	71
Tabla 30. Severidad para fallo de elementos rodantes	73
Tabla 31. Fallos propuestos para elementos rodantes	73
Tabla 32. Estudios realizados para simular cavitación	76
Tabla 33. Datos técnicos bomba GOULSD e-SV	80
Tabla 34. Revisión bibliográfica de las condiciones de operación e instrumentación de	
sistemas de bombeo con varacion de caudal en la descarga	81
Tabla 35. Revisión bibliográfica para la guía de práctica	105

1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Antecedentes

En el sector industrial, el Mantenimiento Basado en la Condición (MBC) ha tenido un gran impacto durante los últimos años, hoy en día, existe considerable evidencia que el MBC presenta ventajas económicas en la mayoría de las industrias, por lo tanto es importante llevar a cabo estudios de investigación que garanticen un proceso productivo continuo. Es por ello que la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca cuenta con un laboratorio para el monitoreo de la condición (MC) donde el Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC) realiza estudios enfocados en maquinaria rotativa.

Como resultados del proceso de investigación el grupo ha realizado varios trabajos de titulación para el grado de Ingeniero Mecánico.

En 2014, Carangui [1] en su proyecto de titulación desarrolla una base de datos de señales de vibraciones mecánicas de una caja reductora combinando fallos de rodamientos y engranajes rectos para fines investigativos en la Universidad Politécnica Salesiana. Así mismo, Nivelo y Romero [2] establecen una base de datos de señales de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos rotativos con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en rodamientos, recopilando las señales de vibración y simulando los fallos en rodamientos y engranajes.

En 2015, Guiracocha [3] a través de la generación de base de datos de señales de emisión acústica, señales de vibración mecánicas e imágenes termográficas sobre un sistema mecánico rotativo, combinó diferentes tipos de fallo y elaboró una guía de prácticas para la detección de fallos en engranajes. Muñoz y Vera [4] establecieron la combinación de fallos de rodamientos y engranajes helicoidales, además elaboraron una guía de práctica para desbalanceo estático.

En 2016, Ortiz y Pérez [5] realizan la adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas.

En 2018, Pacheco [6] en su trabajo de titulación realiza la adquisición de señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa. Por otro lado, Chingal [7] presenta la adquisición de señales de corriente del motor de inducción combinando fallos en la maquinaria rotativa y elaboración de una guía de práctica sobre detección de fallos por medio del Análisis de Firma de Corriente de Motor (AFCM).

Actualmente en el grupo de investigación se encuentra en desarrollo dos proyectos de titulación. El primero, es llevado a cabo por Lojano [8], quien realiza un estudio comparativo para la detección de severidad de fallos en engranes rectos a través de señales acústicas y de vibración. El segundo proyecto, es desarrollado por Llivicura [9], que trata sobre la evaluación de indicadores de condición extraídos del dominio de frecuencia, para el diagnóstico de fallos en cajas de engranajes rectos.

En la Tabla 1, se detalla brevemente el historial de proyectos de titulación finalizados y en desarrollo bajo la aistencia del GIDTEC, se puede observar que el enfoque de dichos proyectos se centra en la adquisición de señales de vibración, emisión acústica, señales acústicas y corriente de motor para el diagnóstico de fallos en engranajes y rodamientos. El más reciente proyecto trata sobre la adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor reciprocante de doble etapa establecido por Cajas y Torres [10] introduciendo de este modo por primera vez el proceso de adquisición de señales acústicas en el grupo de investigación.

Autor	Título	Descripción	Señales	Mecanismo	
(año)	Titulo	Descripcion	adquiridas	estudiado	
	Establecimiento de un base				
	de datos de señales de	Se adquirió señales de			
	vibraciones mecánicas de	vibración mecánica y	Vibración		
Carapani	una caja reductora	emisión acústica en un	mecánica	Engranajes.	
(2014)	combinando fallos de	sistema rotativo, mecanica.			
(2014)	rodamientos y engranes	simulando fallos en	Emisión	Rodamientos.	
	rectos para fines	rodamientos y engranajes	acústica		
	investigativos en la	helicoidales en una caja de	acustica.		
	Universidad Politécnica	engranajes.			
	Salesiana.				
	Establecimiento de una base			Sistema	
	de datos de señales de	Se adquirió señales de	Vibración	macánico	
	vibraciones mecánicas para	emisión acústica,	mecánica.	mecanico	
Nivelo v	sistemas mecánicos con la	vibración mecánica e		iotativo.	
Pomoro	combinación de diferentes	imágenes termográficas	Emisión	Enormaios	
(2014)	tipos de fallos y elaboración	sobre un sistema	acústica.	Eligranajes.	
(2014)	de guías de prácticas para	mecánico rotativo.		Rodomientos	
	detección de fallos en			Rodannentos.	
	rodamientos.				

Tabla 1. Proyectos de titulación culminados y en desarrollo en el GIDTEC

Autor	Título	Descripción	Señales	Mecanismo
(año)		•	adquiridas	estudiado
Guiracocha	Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones acústicas e imágenes termográficas	Se adquirió señales de emisión acústica, vibración mecánica e	Vibración mecánica.	Sistema mecánico rotativo.
(2015)	2015) infrarrojas para un sistema mecánico rotativo con la	imágenes termográficas sobre un sistema	Emision acústica.	Engranajes.
	combinación de diferentes tipos de fallos.	mecánico rotativo.		Rodamientos.
	Establecimiento de una base	Se adquirió señales de		
	de datos de señales de	vibración mecánica y		
Muñoz y Vera	vibraciones mecánicas y acústicas de un sistema	emisión acústica en un sistema mecánico	Vibración mecánica.	Engranajes.
(2013)	mecánico rotativo con la combinación de fallos de rodamientos y engranajes	rotativo, simulando fallos en rodamientos y engranajes helicoidales en	Emisión acústica.	Rodamientos.
	helicoidales.	una caja de engranajes.		
Ortiz y Pérez (2016)	Adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas.	Se analizó la comparación de las señales de emisiones acústicas y señales de vibración adquiridas en un sistema mecánico rotativo con diferentes configuraciones y construcciones de fallos en rodamientos y engranajes.	Vibración mecánica. Emisión acústica.	Engranajes. Rodamientos.
Chingal (2018)	Adquisición de señales de corriente del motor de inducción combinando fallos en la maquinaria rotativa y elaboración de una guía de práctica sobre detección de fallos por medio del "AFCM".	Se adquieren señales de corriente en el motor de inducción, para la detección de fallos de engranajes por medio del análisis de firma de corriente del motor.	Vibración mecánica. Corriente.	Engranajes. Motor de Inducción.
Pacheco (2018)	Adquisición de señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa.	Se levanta una base de datos de severidad de fallos en engranajes y rodamientos, por medio de la adquisición de	Vibración Mecánica. Emisión acústica.	Engranajes. Rodamientos.

Autor (año)	Título	Descripción señales de vibración y emisión acústica.	Señales adquiridas	Mecanismo estudiado
Cajas y Torres (2018)	Adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor reciprocante de doble etapa.	Se levanta una base de datos, por medio de la adquisición de señales acústicas y de vibración de un compresor reciprocante, combinando fallos de elementos mecánicos.	Vibración mecánica. Señales Acústicas. Emisión Acústica.	Compresor reciprocante.
En desarrollo por Llivicura (2018)	Evaluación de indicadores de condición extraídos del dominio de frecuencia para el diagnóstico de fallos en cajas de engranajes rectos.	Evaluación de indicadores de condición en el dominio de la frecuencia para mejorar la exactitud de diagnóstico de fallos.	Vibración mecánica.	Engranajes rectos.
En desarrollo por Lojano (2018)	Señales acústicas y de vibración: estudio comparativo para la detección de severidad de fallos en engranes rectos.	Levantar una base de datos de las señales acústicas y de vibración para la detección de severidad de fallos en engranes rectos.	Vibración mecánica. Señales Acústicas.	Engranajes rectos.

1.1.2. Importancia y alcances

Máquinas de todo tipo son usadas en casi todo aspecto de la vida. Cuando una máquina falla las consecuencias pueden ir desde la molestia hasta el desastre financiero o lesiones personales y posible pérdida de vidas. El mantenimiento juega un rol muy importante en los sistemas industriales, puesto que permite mejorar la disponibilidad, confiabilidad y seguridad, mientras que reduce los costes de ciclo de vida [11]. El mantenimiento basado en la condición permite conocer el estado actual de la máquina a través de información recogida durante el monitoreo de la condición [7]. Es por ello que el continuo monitoreo de la máquina a nivel industrial, reduce paradas no programadas y contribuye a una eficiente producción [7].

Una bomba centrifuga es una máquina rotativa ampliamente usada en varios campos tales como: agricultura, industria química, bombeo de agua, industria de alimentos, sector papelero, etc. [12]. El presente trabajo desarrolla una metodología en el mantenimiento basado en la condición para la detección de fallos en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical. Además, de implementar una guía práctica para detectar fallos a través de señales de vibración.

La Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, tiene a disposición el laboratorio de vibraciones con el cual se realiza el análisis de señales para el monitoreo de la condición; además, brinda los recursos necesarios para simular diferentes fallos que se pueden presentar en maquinaria rotativa, aportando conocimientos en el mantenimiento basado en la condición, los cuales son aplicados en las industrias [7].



Figura 1. Bomba centrífuga multietapa vertical, modelo 3SV10GE4F20, marca Goulds

1.1.3. Delimitación

El banco de pruebas de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, permite simular fallos en bombas centrifugas multietapa verticales, fallos por desbalanceo de eje, rodamientos, sello mecánico, impulsor y cavitación. El banco de pruebas y la configuración de los sistemas planteados en este trabajo permiten establecer una importante base de datos, útil para la investigación en tecnologías industriales. El grupo de investigación y desarrollo en tecnologías industriales (GIDTEC), trabaja en este proyecto que permitirá a las industrias implementar un mantenimiento basado en la condición en bombas centrifugas multietapa.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1.Objetivo general

• Adquirir señales acústicas y vibracionales para el diagnóstico de fallos en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar las técnicas del monitoreo de la condición y los fallos más relevantes en los elementos mecánicos críticos de las bombas centrífugas multietapa de eje vertical.
- Adecuar un banco para pruebas de una bomba centrífuga multietapa de eje vertical en el laboratorio de vibraciones, para realizar el levantamiento de la base de datos de señales acústicas y vibraciones de fallos simulados en elementos mecánicos críticos.
- Adquirir datos de señales acústicas y de vibración de diferentes fallos simulados en los elementos mecánicos críticos de la bomba centrífuga multietapa de eje vertical en el laboratorio de vibraciones.
- Elaborar una guía de práctica para la detección de fallos por medio de señales vibracionales en la bomba centrífuga multietapa de eje vertical del laboratorio de vibraciones.

2. CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Terminología del mantenimiento

La norma europea UNE-EN 13306 define al mantenimiento como la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión, durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el que pueda realizar su función requerida.

En la Figura 2, se presenta la clasificación del mantenimiento y sus componentes según la Norma UNE-EN 13306.



Figura 2. Clasificación del mantenimiento. Fuente: Norma UNE - EN 13306

En su apartado 6, la norma UNE-EN13306, establece nuevos tipos y estrategias de mantenimiento las cuales junto con su definición son presentadas a continuación:

- Mantenimiento preventivo.- Mantenimiento ejecutado a intervalos predeterminados o de acuerdo con unos criterios preescritos, y destinado a la probabilidad de fallo de un elemento.
- Mantenimiento predictivo según condición.- Mantenimiento preventivo basado en la monitorización del funcionamiento y/o de los parámetros del elemento, y las acciones subsiguientes.

- Mantenimiento sistemático o predeterminado.- Mantenimiento preventivo ejecutado de acuerdo a los intervalos de tiempo establecidos, o a un número de unidades de uso, pero sin investigación previa de la condición del elemento.
- **Mantenimiento programado.-** Mantenimiento preventivo ejecutado de acuerdo a un programa de tiempo establecido, o a un número de unidades de uso definido.
- Mantenimiento correctivo.- Mantenimiento ejecutado después del reconocimiento de una avería, y destinado a llevar a un elemento a un estado en el que pueda desarrollar una función requerida.
- Mantenimiento diferido o programable.- Mantenimiento correctivo que no es ejecutado inmediatamente despúes de la detección de una avería, si no que es retrasado de acuerdo con las reglas de mantenimiento dadas.
- Mantenimiento inmediato o urgente.- Mantenimieto correctivo que es ejecutado inmediatamente después de que la avería se haya detectado con el fin de evitar consecuencias inaceptables.

2.2. Monitoreo de la Condición

El monitoreo de la condición (MC) es un medio para evaluar el estado de las máquinas y alertar de posibles fallos incipientes, de este modo se pueden sugerir acciones de mantenimiento. El MC consiste en la recopilación de datos del sistema a través de diversos sensores para luego procesar los datos y obtener información significativa; se pueden utilizar diversas técnicas de monitoreo de la condición para detectar condiciones de fallo e incluso identificar que componente tiene el fallo en la máquina [13].

2.3. Mantenimiento basado en la condición

El Mantenimiento Basado en la Condición (MBC) tiene como objetivo la prolongación del funcionamiento de la maquinaria recomendando acciones de mantenimiento basadas en la información recolectada a través del monitoreo de condición, es decir para aumentar la productividad y reducir los costos de mantenimiento se recomienda establecer un programa de mantenimiento basado en la condición [13].

Las principales características del mantenimiento basado en la condición son: aviso previo del fallo inminente, mayor precisión en la predicción del fallo y ayuda en los procedimientos de diagnóstico, ya que se puede asociar el fallo de componentes específicos a través de los parámetros o atributos supervisados [14], [15].

Un programa de mantenimiento basado en la condición consta de tres pasos importantes: en primera instancia la adquisición de datos donde se recoge y almacena la señal monitoreada, luego el procesamiento de datos donde la información obtenida se analiza para una mejor comprensión e interpretación, finalmente la toma de decisiones, aquí se deciden las acciones de mantenimiento basadas en los resultados del diagnóstico y/o de pronóstico de fallos [14].

2.4. Monitoreo de las vibraciones en bombas

Las bombas generan una señal de vibración que provoca un impulso de presión en el fluido bombeado, cuando cada álabe pasa el puerto de salida, este excita la frecuencia de vibración del paso de álabes en la tuberia, y por lo general se transmite a través de la máquina, de esta forma, se tiene información acerca del comportamiento de la misma. Esto significa que la señal de vibración estará compuesta de distintas vibraciones que corresponden a cada una de las partes de la bomba [16], [17], [18].

Cuando un fallo está comenzando, los niveles de vibración y el espectro de una máquina son a menudo afectados. Por lo tanto, la firma de vibración de una máquina puede ser usada para detectar defectos en el equipo. Hoy en día, acelerómetros son usados como el sensor más confiable debido a su amplio rango de frecuencia. Son fáciles de instalar y confiables para medir. Las señales de vibraciones pueden ser procesadas de muchas formas para analizar diferentes tipos de información. Las principales técnicas usadas en este campo son el análisis de señales en el domino del tiempo y en el dominio de la frecuencia [19].

2.5. Señales de vibración

Una señal de vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento [16]. Otro concepto de vibración se puede decir que es un intercambio de energía cinética en cuerpos con rigidez y masa finitas, el cual surge de una entrada de energía dependiente del tiempo. Este intercambio de energía puede ser producido por [20]:

- Desequilibrio en máquinas rotatorias.
- Entrada de energía acústica.
- Circulación de fluidos o masas.
- Energía electromagnética.

2.6. Niveles de vibración en máquinas rotativas

Los niveles de vibración se dan según el tipo de máquina y su función que desempeña. La fricción en una máquina absorbe energía con gran facilidad y es inversamente proporcional al nivel de vibración, es decir, si una máquina tiene poca fricción, su nivel de vibración tiende a ser muy alto, ya que la energía de vibración se va incrementando debido a la falta de absorción. Por otra parte, una máquina con una fricción más importante tendrá niveles de vibración más bajos, ya que su energía se absorbe más rápidamente. Una estructura típica tendrá muchas frecuencias naturales. Cuando ocurre la resonancia, los niveles de vibración que resultan pueden ser muy altos y pueden causar daños muy rápidamente [21].

2.6.1. Ventajas y limitaciones sobre el monitoreo de las señales de vibración

Para llevar a cabo un correcto análisis de vibración se tiene que conocer previamente las siguientes ventajas y limitaciones que respectan al monitoreo de las señales de vibración [22]. **Ventajas:**

- En general los sensores de vibración (acelerómetros) son de fácil instalación en la máquina.
- Existen diferentes tamaños y tipos de acelerómetros para facilitar el posicionamiento en la máquina.
- Tanto el análisis en el dominio del tiempo como en el dominio de frecuencia de la señal de vibración proporcionan información útil sobre la gravedad del fallo.

Limitaciones:

- Dificultad para controlar la vibración que surge de otras partes de la misma máquina u otras máquinas.
- Vibración de fondo intrusiva puede contaminar la señal y dificultar el diagnóstico.
- Este tipo de técnica requiere de un mínimo de personal calificado, los cuales serán los encargados de adquirir, analizar, procesar y tomar las decisiones; por lo que se podría requerir de una inversión inicial considerable para la formación del personal.
- La necesidad de adquisición de los equipos que toman y procesan las medidas vibracionales en la maquinaria los cuales tienen un costo elevado [23].

2.6.2. Estudios de vibración en bombas centrífugas

Es conocido, que las bombas centrífugas son las máquinas hidraúlicas más utilizadas en la industria para el transporte de fluidos, es por ello que el monitoreo de la condición se hace presente a través de los análisis de vibración para diagnóstico de fallos. Procesos de

investigación, han desarrollarado varios proyectos relacionados con el estudio de vibraciones entre ellos, metodologías para el diagnóstico de fallos por desalineación en bombas centrífugas horizontales de flujo radial mediante señales de vibración, empleando técnicas para la adquisición de datos computarizados [24]. Medición y análisis de vibraciones en un conjunto bomba – motor para descartar problemas originados por resonacia o desbalanceo [25]. Uso del algoritmo de árbol de decisión para el diagnóstico de fallos en una bomba centrífuga de un solo impulsor a través de una característica estadística extraída de señales de vibración de condiciones buenas y malas de sus componentes internos como: impulsor, sello mecánico, cavitación, eje y rodamientos [26].

2.6.3. Representación gráfica de la onda

Amplitud

La amplitud denominada también longitud de pico a pico, es representada gráficamente mediante un oscilograma que permite interpretar fácilmente un parámetro de vibración vinculado a la fuerza o intensidad de la misma. La amplitud se define también como el máximo valor que alcanza una oscilación en un ciclo, en la Figura 3 se ejemplifica a la amplitud de una señal de onda con respecto al tiempo [27]



Figura 3. Ondas con diferente amplitud en el dominio del tiempo(a) Pequeña amplitud. (b) Gran amplitud [28]

Periodo

El periodo T se define como el tiempo transcurrido entre una perturbación y la siguiente. Se mide en segundos (s) o milisegundos (ms), es decir la milésima parte de un segundo. En la Figura 4, se observa este detalle [28].



Figura 4. Periodo de onda [23]

Frecuencia

Uno de los parámetros fundamentales en las señales de vibración es la frecuencia la cual se define como la cantidad de ciclos por segundo, o lo que es lo mismo, la cantidad de perturbaciones por segundo. Se expresa en Hertz en honor al alemán Heinrich Hertz, científico del siglo XIX que descubrió las ondas de radio [28]. Matemáticamente la frecuencia (F) tiene relación con el periodo (T) mediante las siguientes ecuaciones:

$$F = \frac{1}{T}$$
 $T = \frac{1}{F}$ Ecuación 1

Transformada rápida de Fourier

La transformada rápida de Fourier conocida como FFT del inglés *Fast Fourier Transform* es un proceso matemático que transforma una señal de un dominio del tiempo en un dominio de frecuencia que produce un espectro complejo de la señal muestreada. Calcula el nivel de potencia espectral y las fases de la señal desde el rango de frecuencia de cero a la mitad de la frecuencia de muestreo. Una de las ventajas de la FFT sobre otras técnicas de dominio de frecuencia es que retiene información de fase de la señal que hace posible y relativamente simple la transformación inversa. Otra ventaja es que puede evaluar mediciones multicanal y análisis del sistema, como la función de respuesta de frecuencia, la coherencia y la correlación [22].

2.7. Señales acústicas

Las señales acústicas son ondas mecánicas longitudinales que necesitan un medio material para su propagación y las partículas del medio actúan en la misma dirección en la que se propaga la onda. Pueden propagarse en medios sólidos, líquidos y gaseosos [29].

A medida que las ondas viajan a través del fluido, los elementos del fluido vibran para producir cambios en densidad y presión a lo largo de la dirección de movimiento de la onda [28]. Para realizar un estudio de señales acústicas en una máquina rotativa, es importante conocer la información básica que contienen las señales acústicas.

2.8. Monitoreo de señales acústicas

Una de las herramientas para el monitoreo de la condición son las señales acústicas, las cuales ultimamente han ganado importancia en la industria para el mantenimiento. El monitoreo de señales acústicas, proporciona información para el procesamiento de señales de elementos mecánicos específicos; es decir, desempeña un papel importante en el diagnóstico de fallos de los componentes críticos especialmente en máquinas rotativas [30].

2.8.1. Estudios de señales acústicas en bombas centrífugas

Las señales acústicas detectadas en puntos estratégicos de la bomba son analizadas para obtener información en el dominio del tiempo o de la frecuencia [22]. En presencia de fallos las señales acústicas transportan información hacia un micrófono usando un medio circundante que es el aire con el objetivo de detectar condiciones anormales dentro o fuera de la bomba. Estudios han mostrado que las señales acústicas se pueden utilizar para monitorear turbinas, compresores, generadores y de manera específica para el monitoreo de rodamientos en equipo rotativo, considerando también la desventaja de tener ruido exterior según el ambiente o medio en el que se realize la captura de la señal [31].

2.8.2. Ventajas y limitaciones del monitoreo de las señales acústicas

El monitoreo de las señales acústicas posee ventajas y limitaciones cuando de tomar una señal acústica se trata, la Tabla 2, muestra estos parámetros [13].

Ventajas	Limitaciones	
Se adquieren sin contacto con la máquina a través	Para garantizar la calidad de la señal, ésta debe estar	
de micrófonos.	libre de ruido de fondo e interferencias.	
Los micrófonos poseen un ancho de banda, que	Al realizar la toma de señales acústicas en espacios	
varía de 2Hz a 22kHz lo que permite una respuesta	cerrados existen riesgos de reflexión de la señal con	
de frecuencia más amplia.	las fronteras de dicho espacio, lo que	
	probablemente produzca una alteración en los	
	resultados.	
Con un micrófono se pueden detectar varias señales	La elección de sensores es limitada debido a que	
de un mismo componente.	existen pocos micrófonos suficientemente robustos	
	que funcionen en ambientes industriales.	

Tabla 2. Ventajas y limitaciones del monitoreo de las señales acústicas [13]

2.8.3. Monitoreo de señales acústicas en bombas

Las señales acústicas son un conjunto de vibraciones que se propagan en el aire o en el líquido mediante ondas acústicas, estas ondas son producidas por el movimeinto mecánico de los

componentes, movimiento del líquido en el interior de las bomba y el sistema de tuberías, los niveles elevados y no deseados del sonido se considera como ruido y producen niveles altos de vibración, además pueden ser considerados como un indicativo de una fallo mecánico potencial en una bomba centrífuga, parte fundamental para el mantenimiento basado en la condición. [32].

2.8.4. Fuentes acústicas en bombas centrífugas

- Fuentes mecánicas

En una bomba en operación se consideran fuentes mecánicas de ruido los componentes y superficies vibrantes de la bomba debido a las agitaciones de presión generadas en el fluido líquido. La instalación incorrecta de los acoplamientos, el roce del cojinete, el sello, el impulsor o la cavitación a menudo generan ruido mecánico. Además, el flujo de bobinado del motor y el ventilador contribuyen al ruido en las bombas centrífugas [33].

- Fuentes hidráulicas

Las fuentes hidráulicas de la acústica en una bomba, tiene relación directa con las fluctuaciones de fluido y presión producidas directamente por el movimiento del líquido en la bomba y el sistema de bombeo. Las fluctuaciones o pulsaciones de la presión, la interacción de la estructura del fluido con las paletas giratorias de los impulsores y el tipo de fluido a bombear se consideran las causas principales de ruido transmitido al aire por una bomba convencional. Se consideran fuentes hidráulicas de la acústica en una bomba; la vibración, la recirculación de succión y descarga, el desequilibrio hidráulico, la parada rotatoria, el golpe de ariete y las inestabilidades del sistema. El tipo de acústica o ruido puede producir una frecuencia discreta o de banda ancha [33].

2.8.5. Acústica de bombas causada por cavitación

La generación de ruido anormal proveniente de una bomba es producido por lo general por el fenómeno de la cavitación y se conoce como "ruido de cavitación". Las burbujas de la cavitación aparecen y se colapsan entre si y en cualquier punto interno del cuerpo de la bomba, esto conlleva a que se produzca una acústica turbulenta ya sea en frecuencia de banda ancha o en una frecuencia discreta [33]. El espectro de banda ancha (1 Hz - 20 KHz), que se pronuncia con componentes de frecuencia discreta, es la característica de la señal acústica obtenida de la bomba centrífuga bajo cavitación [34]. Muchas investigaciones sobre máquinas hidráulicas han demostrado que los niveles de ruido aumentan cuando una bomba funciona bajo cavitación. La naturaleza de la cavitación es caótica, por lo tanto, forma parte del ruido turbulento [33]. Hay dos tipos de procesos hidrodinámicos que inducen ruido de cavitación estos se detallan en la Tabla 3.

Proceso hidrodinámico		Consecuencias		
	-	Paradas a altas velocidades en su nucleo.		
Decremento de la tasa de flujo.	-	Disminución significativa de la presión. estática.		
	-	Inestabilidad en la presión y el flujo de masa en toda		
Insuficiente cabeza de succión de la bomba.		la bomba.		
	-	Erosión del impulsor.		
	-	Daños al eje de la bomba.		

Tabla 3. Procesos hidrodinámicos causales de ruido por cavitación [32]

2.8.6. Propagación de la acústica en el interior de las bombas

En el interior de una bomba se producen una serie de perturbaciones acústicas con distintas severidades que en su mayoría se propagan a la tubería de descarga y otra parte se disipa de distintas formas mediante vibraciones, calentamientos entre otras. Dentro de los mecanismos de transmisión acústica en el interior de las bombas, la transmisión de sonido por la voluta, la propagación del sonido a través de los canales del rodete y la transmisión en la zona de la lengüeta son tres factores que recogen información detallada sobre parámetros acústicos y fenómenos que pueden generar perturbaciones [35].

2.9. Bombas Hidraúlicas

Por principio, bombear un fluido líquido, es referirse a su transporte de un punto a otro, por lo general de un lugar más bajo a uno más alto, venciendo presiones y desniveles, mediante una máquina hidráulica llamada bomba [36].

2.9.1. Clasificación general de las bombas

En la Figura 5, clasificación de bombas, se muestra dos familias principales de bombas: bombas de energía cinética y bombas de desplazamiento positivo. Estas dos familias se dividen en grupos más pequeños para servicios específicos. Ambas familias de bombas agregan energía al líquido, para moverlo a través de una tubería de un lugar a otro. Dentro de esta clasificación se consideró para el presente trabajo una bomba multietapa de eje vertical, perteneciente al grupo de bombas centrífugas de flujo axial por el sentido de movimiento del flujo.



Figura 5. Clasificación general de las bombas

2.9.2. Funcionamiento de una bomba centrífuga

Una bomba centrífuga es la más común y la más utilizada en la industria, consta de una rueda con álabes llamada rodete o impulsor, que gira libremente alrededor del eje cuando pasa un fluido por su interior. En el rodete tiene lugar una transformación de energía mecánica a energía del flujo, lo que permite el transporte del líquido a presión, estas se conocen como turbomáquinas consumidoras de energía mecánica como ejemplo bombas hidráulicas, ventiladores y turbocompresores [37]. La Figura 6, presenta las partes de una bomba centrífuga monobloque.



Figura 6. Partes principales de una bomba centrífuga

2.9.3. Terminología básica de un sistema de bombeo

Son los términos técnicos necesarios entender la instalación de un sistema de bombeo. En la tabla 4, se detalla cada término con su descripción.

Término Técnico	Descripción	Fórmula
	Son las pérdidas debidas al rozamiento	
	del líquido con las paredes de la tubería,	
	válvulas, codos y, en general, de la	
	tubería y accesorios. Donde H_a	
Pérdidas de carga	representa las pérdidas por fricción en la	$H_L = H_a + H_s \ [mca]$
	tubería y H_s las pérdidas por accesorios.	
	La unidad de medida en el sistema	
	métrico internacional es el metro de	
	columna de agua [<i>mca</i>].	
	Es el volumen de líquido elevado por	
	unidad de tiempo. Se expresa en metros	
	cúbicos por hora (m^3/s) o en litros por	
Caudal o capacidad	minuto (l/min). Donde: Q, es el caudal,	$Q = V * A [m^3/s]$
	V la velocidad y A el área de la sección	
	de la tubería.	
	Es la potencia precisada por la bomba	
	exclusivamente para bombear el líquido.	
Potencia hidráulica	Donde Q es el caudal, Hm la altura	Ph = Hm * f * g * Q [w]
	manométrica, ${f f}$ la densidad del fluido y g	
	la constante gravitacional. Su unidad de	
	medida es el watt ó vatio $[w]$.	
	Conocida también como potencia al	
	freno. Es la potencia en el eje de la	
	bomba y equivale a la potencia hidráulica	
	más la potencia consumida en compensar	
Potencia absorbida por	los distintos tipos de pérdidas que se	$Pab = \frac{Q * Hm * \Upsilon}{W} [w]$
el motor	ocasionan en la bomba. Por consiguiente,	p
	es mayor que la potencia hidráulica.	
	Donde p es rendimiento de la bomba.	
	Llamado también rendimiento de la	
	bomba, equivale al cociente de dividir la	$p = \frac{Q * Hm * Y}{Pab} [\%]$
Rendimiento Mecánico	potencia hidráulica y la potencia	Tub
	absorbida. Se expresa en porcentajes y es	
	siempre menor que la unidad.	
W -1	viene impuesta por el motor de	
velocidad de rotación.	accionamiento. Se expresa en	
	revoluciones por minuto (r.p.m.).	

Tabla 4. Terminología básica de las bombas centrífugas [35]

El éxito de un sistema de bombeo es garantizar que el fluido llegue a su destino en las mejores condiciones posibles, para lograrlo, se debe elegir el tipo de bomba correcto y evitar la toda costa la cavitación que es un serio problema que afecta a las bombas al reducir su vida útil en un tiempo relativamente corto. La Tabla 5, muetra los tipos de alturas que se deben considerar en un sitema de bombeo para garantizar la correcta instalación de la bomba y de las condiciones de operación, la Figura 7, ilustra un ejemplo.

Término Técnico	Descripción
Altura geométrica (Hg).	Es la altura vertical comprendida entre el nivel del líquido a
	elevar hasta el punto más alto.
Altura de aspiración (Hs)	Comprende la distancia desde el nivel del líquido hasta el eje de
	la bomba.
Altura de impulsión (Hd)	Se mide desde la descaraga de la bomba hasta el punto de
	máxima elevación.

Tabla 5. Terminología de alturas para un sistema de bombeo



Figura 7. Alturas para un sitema de bombeo

2.9.4. Cavitación y golpe de ariete en una bomba

La cavitación en las bombas produce dos efectos perjudiciales: disminución en el rendimiento y erosión. La aparición de este fenómeno en las bombas esta íntimamente relacionada con el tipo de bomba, la instalación y las consideraciones de servicio de la misma. El éxito de evitar la cavitación, entre otros factores, depende de la instalación del sistema de bombeo, en conseguir que la altura neta de entrada disponible en la succión (NPSHd) sea mayor o igual a la altura neta de entrada requerida (NPSHr) por el fabricante de la bomba, esto se obvtiene mediante las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.
Respecto al golpe de ariete se presenta como un fenómeno transitorio y por lo tanto de régimen variable en el que la tubería ya no es rígida y el fluido es comprensible. Este fenómeno se produce en los conductos al cerrar o abrir una válvula y al poner en marcha o parar una máquina hidraúlica o también al disminuir bruscamente el caudal. No puede producirse en el arranque de una bomba porque la presión que produce la bomba no puede exceder el valor máximo que indica su curva característica, pero habrá que tener precausión en la parada de la bomba ya que la válvula de impulsión deberá ser cerrada muy lentamente para evitar el golpe de ariete [38].

2.9.5. Altura de Succión Neta Positiva – disponible

La NPSHd "Altura de Succión Neta Positiva" por sus siglas en inglés *Net Positive Suction Head* es un parámetro utilizado en la bomba para analizar la cavitación del un sistema de bombeo. La Figura 8, es una representación del nivel A del líquido en el depósito de aspiración, en el cual puede estar a presión atmosférica a una sobrepresión o a una depresión, E es la entrada de la bomba y Hs es la altura de aspiración la cual tiene relación con la línea de entrada de la bomba Z_E y el nivel del líquido Z_A [38]. Esta ilustración puede determinar las ecuaciones para la condición de no cavitación:



Figura 8. Determinación de la altura de aspiración de una bomba

La NPSHd se obtiene aplicando la ecuación de Bernoulli y realciona las siguientes variables:

$$NPSH_d = \frac{P_A - P_S}{fg} - H_S - H_{rA-E}$$
 Ecuación 2

donde:

 P_A = Presión atmosférica o presión en el depósito de aspiración.

 P_s = Presión en la línea se succión de la bomba, en mca.

f = Densidad del fluido, en.

 $g = \text{Constante gravitational, 9.81} m/s^2.$

 H_{rA-E} = Pérdidas de carga en la aspiración, en metros.

 H_s = Cota de entrada de la bomba sobre el nivel del depósito de aspiración.

En este último $H_s > 0$ si el eje de la bomba esta mas elevado que el nivel del líquido (bomba en aspiración), caso contrario si $H_s < 0$ si la entrada de la bomba esta mas baja que dicho nivel (bomba en carga).

La Figura 9, muestra la curva caudal respecto a la NPSHd, es decir, la relación existente entre el caudal y la diferencia de presiones del sistema.



Figura 9. Curva NPSHd

2.9.6. Altura Neta Positiva en la Succión – requerida (NPSHr)

La bomba requiere que haya disponible a la entrada un mínimo de energía, para hacer el recorrido desde dicha entrada hasta el punto de mínima presión sin que aparezca cavitación, por lo general esta información la entrega el fabricante de la bomba, se calcula con la ecuación que aparece a continuación:

$$NPSH_r = (NPSH_d)_{min} = \left(\frac{P_A - P_S}{fg} + \frac{C_E^2}{2g}\right)_{min}$$
 Ecuación 3
$$NPSH_r = f(Q)$$

La NPSHr, en una bomba a velocidad constante aumenta con el caudal como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Curva NPSHr

2.9.7. Bombas centrífugas multietapa de eje vertical

Una bomba centrífuga multietapa de eje vertical, es una bomba con distribución de flujo axial cuya característica principal consiste en una base y un cabezal de bomba, en su interior se alojan una serie de impulsores los cuales con la ayuda de un motor, mueven la masa del líquido por etapas con el objetivo de obtener mayor cabeza de carga y de esta manera elevar el fluido a mayores alturas [39]. La Figura 11, ilustra una bomba centrífuga multietapa de eje vertical, esta clase de máquina hidráulica se utilizará en el presente trabajo para la adquisición de señales acústicas y de vibración.



Figura 11. Bomba Centrífuga multietapa eje vertical

2.9.8. Descripción de las partes

La Figura 12, ilustra un corte en ³/₄ de una bomba centrífuga multietapa vertical 3SV10GE4F20 ITT- GOULDS PUMPS para la serie e-SV, donde se presentan las principales partes (Tabla 6) y a continuación se detallan dos componentes mecánicos que son de interés para el desarrollo de la parte experimental de éste trabajo; estos componentes son: impulsores y sello mecánico.



Figura 12. Esquema bomba centrífuga multietapa [39]

Número	Descripción	Material		
1	Tubería de aspiración	Acero Inoxidable		
2	Impulsor	Acero Inoxidable		
3	Caja	Acero Inoxidable		
4	Varillas de unión	Acero al Carbono / Zincado		
5	Eje	Acero Inoxidable		
6	Junta de estanquidad	Acero Inoxidable		
7	Sello mecánico	Carburo de Silicio/Carbono/Viton		
8	Adaptador	Acero inoxidable		
9	Acople	Hierro Fundido		
10	Tapón de llenado/drenaje	Acero Inoxidable		
11	Placa desello	Viton		
12	Elastómero	Acero Inoxidable		
13	Protector de acople	Carburo de Tungsteno		
14	Casquillo de eje y buje	Acero Inoxidable		
15	Anillo de desgaste	PPS (polisulfuro de fenileno)		
16	Difusor	Acero Inoxidable		
17	Base	Acero Inoxidable		

Tabla 6. Partes principales de una bomba centrífuga multietapa vertical

Impulsores o rodetes

Los impulsores o rodetes, en una bomba centrífuga multietapa, son piezas giratorias ubicadas en serie que convierte la energía eléctrica del motor en energía cinética en el fluido al acelerar el fluido radialmente con respecto al eje de los impulsores [40]. El cuerpo central es el mecanismo para unir los impulsores al eje de la bomba. Extendiéndose hacia afuera desde el centro hay una serie de brazos rígidos curvados llamados álabes como se muestra en la Figura 13. La acción de los álabes es lanzar el fluido hacia el interior de la carcasa de la voluta y las fuerzas centrífugas involucradas transfieren la energía mecánica del motor al fluido [22]. Los

impulsores generalmente están hechos de acero, bronce, aluminio, latón o plástico. La forma, el tamaño y la velocidad del impulsor son los factores influyentes que determinan el rendimiento de la bomba [40].



Figura 13. Impulsor cerrado. Bomba multietapa

Sellos mecánicos

El sello mecánico, ver Figura 14, ha demostrado ser el método más eficiente para sellar el eje rotatorio, se compone de dos secciones que se mantienen en contacto mediante un resorte, una parte tiene un material cerámico y la otro carbono, la cara rotacional gira con el eje y se desliza sobre la cara estacionaria montada en el cuerpo de la bomba o en la placa del sello. Es gracias a la planitud y la precisión mecánica de las caras de roce por lo que se produce una película de fluido entre las caras, sellando herméticamente el conjunto [41].



Figura 14. Sello mecánico

2.9.9. Funcionamiento de una bomba centrífuga multietapa vertical

Una bomba centrífuga multietapa vertical ideal para bombear bajos caudales a grandes alturas, cuenta con un cuerpo cilíndrico que alberga un conjunto de diez impulsores cerrados, cada uno de ellos se encuentra encerrado en un difusor con toberas que ayudan a la compresión paulatina del fluido por etapas a caudal constante hasta quedar presurizado en la cámara de presión y desfogar el mismo a través de la tobera de descarga de la carcasa.

En la Figura 15, se indica a detalle el funcionamiento de la bomba centrífuga multietapa donde el fluido (flecha azul) es conducido al ojo del primer impulsor, luego por la acción centrífuga del mismo es dirigido al primer difusor como se muestra en el detalle A. El difusor, permite el paso del fluido al segundo impulsor (detalle B), nuevamente la acción centrífuga del impulsor lleva el fluido (flecha a amarilla) al segundo difusor (detalle A) que a su vez conduce el fluido al tercer impulsor. Por último el tercer impulsor lleva el fluido representado por la flecha roja hacia el último difusor donde alcanza la presión máxima de bombeo y esta se transmite alrededor de la caja hasta desfogar por la brida de salida como se muestra en la Figura 16.



Figura 15. Principio de funcionamiento de una bomba centrífuga multietapa vertical



Figura 16. Principio de funcionamiento de una bomba centrífuga multietapa vertical - descarga de flujo

2.9.10. Caracterización de la bomba centrífuga multietapa vertical modelo 3SV10GE4F20

Las distintas versiones de bombas multietapa verticales forman parte de la línea e-SV, están identificadas por un número de código de producto en la etiqueta de la bomba. Este número es también el número de catálogo de la bomba. El significado de cada dígito en el número de código del producto se muestra en la Tabla 7.

	Modelo \rightarrow 3 SV 10 G E 4 F 2 0
3	Flujo Nominal →16GPM
SV	Stainless Vertical. Esp. (Inoxidable Vertical)
10	Número de impulsores o número de etapas $\rightarrow 10$
G	Opción de configuración → CI-304
E	Potencia del motor HP \rightarrow 2hp
4	$Polo - Hz - Fase \rightarrow 4 (2 - 60 - 3)$
F	Voltaje \rightarrow F (208-230/460 V)
2	Recinto del motor $\rightarrow 2$ (TEFC)
0	Material del sello $\rightarrow 0$ (carb-silcar-viton)

Tabla 7. Significado de cada dígito del modelo de la bomba 3SV10GE4F20

La Tabla 8, presenta los principales datos técnicos de la bomba centrifuga multietapa vertical modelo 3SV10GE4F20.

Datos técnicos bomba multietapa vertical 3SV10GE4F20					
Modelo	3SV10GE4F20				
Tipo	Centrífuga flujo axial – eje vertical				
Potencia	2 HP (1.5 KW)				
Alimentación del motor	Trifásico 208-230/460 V				
Velocidad del motor	3500 rpm				
Tipo de transmisión	Acople de aluminio				
N° de etapas	10 etapas				
Flujo nominal	15 GPM				
Rango de flujo	(3 - 22) GPM				
Máxima cabeza	1085 ft				
Máxima presión de trabajo	580 PSIG				
Presión en la descarga	10.7 BAR				
Rango de temperatura	-20 °F – 250 °F, (-30°C – 121°C)				
Eficiencia máxima de la bomba	60%				

Tabla 8. Principales datos técnicos de la bomba multietapa vertical 3SV10GE4F20

2.9.11. Problemas comunes en bombas centrífugas

Las bombas centrífugas presentan dos grandes problemas considerados comunes en el mundo industrial el primero es por cavitación y el segundo por la presencia de cargas radiales fluctuantes en el impulsor causadas por fuerzas desequilibradas que pueden deberse a la desigualdad en el flujo a través de los pasos del impulsor, o un desequilibrio mecánico superpuesto a la carga radial constante. Las cargas hidráulicas dependen del tipo y tamaño del impulsor y la carcasa, las operaciones de las bombas están condicionadas por la velocidad de la bomba, la presión de succión del fluido y el punto de operación de la bomba. La magnitud y la dirección de las cargas hidráulicas pueden cambiar enormemente con los cambios en estos factores; pero en general, las cargas hidráulicas más bajas existirán cuando la bomba funcione con la máxima eficiencia. Estas fuerzas fluctuantes generadas dentro de la bomba se consideran solo en la medida en que son un fondo y son complementarias a la cavitación [22].

2.10. Cavitación

La cavitación es una condición anormal en los sistemas de bombeo [42]. Es considerada como el problema más común que ocurre en el lado de succión de las bombas centrífugas. La cavitación surge cuando la presión del fluido dentro de la bomba cae por debajo de la presión de vapor del fluido. Durante la cavitación, la burbuja de vapor aparece en el fluido en movimiento donde la presión del fluido es menor que su presión de vapor [40].

La formación de burbujas de vapor puede tener efectos nocivos dentro de un sistema de bombeo entre ellos un colapso catastrófico de la bomba en poco tiempo provocando erosión en la carcasa y todos sus componentes. Para conocer más a detalle este fenómeno, la Figura 17, ilustra las fases de implosión de una burbuja desde su formación hasta su colapso final con la estructura. El problema se ve agravado por el hecho de que el impulsor está encerrado, por lo general, el primer signo notable de cavitación es la aparición de ruidos y vibraciones severas [22].



Figura 17. Etapas de implosión de una burbuja por cavitación [43]

Otra consecuencia importante de cavitación es una disminución en el rendimiento de la bomba, que se evidencia por un descenso de la cabeza, como se indica en la Figura 19. La caída en el rendimiento y en la curva caudal - altura puede ocurrir antes de que se alcanze la presión de vapor [39].

2.10.1. Tipos de Cavitación

Cavitación incipiente

Es una etapa inicial de la cavitación en la que empieza a ser visible la formación de las burbujas. Las condiciones en las que la cavitación se vuelve detectable no son las mismas condiciones para que la cavitación desaparezca. Por lo general, se requiere un aumento de la presión por encima de la cual aparece la cavitación. Para realizar estudios de vibración o señales acústicas, se determina su presencia con la caída del 3% de la cabeza de la bomba con respecto a la cabeza en condiciones normales según la norma ANSI HI 1.6 [43].

La cavitación de vórtice

Se produce cuando los núcleos de los vórtices generados por turbulencia contienen zonas de alto esfuerzo cortante. Dichas cavidades pueden aparecer como viajeras o fijas en el interior de la bomba [44].

La cavitación viajera

Es donde las burbujas transitorias individuales aparecen en el líquido y se mueven con el líquido hasta que colapsan. Invariablemente, tales burbujas aparecen en puntos de baja presión en los límites sólidos o dentro del cuerpo de líquido en puntos de baja presión generados en un flujo turbulento [22].

La cavitación vibratoria

Es un caso especial y ocurre cuando la velocidad del flujo es tan baja que la recirculación ocurre en la bomba y los elementos del líquido experimentan muchos ciclos de cavitación [45].

2.10.2. Síntomas de la cavitación

Uno o varios de los siguientes síntomas que se presentan en la Figura 18, afectan adversamente el rendimiento de la bomba, en casos severos pueden dañar partes de ella. Estos síntomas son, por lo tanto, muy importantes en el monitoreo de la condición [33].



Figura 18. Síntomas de cavitación [46]

2.10.3. Regímenes de flujo de cavitación

Para las bombas centrífugas, al reducir progresivamente el caudal desde el punto de mejor eficiencia, BEP por sus siglas en inglés *Best Efficient Point*, se pueden observar tres regímenes de cavitación de flujo distintos: estable, inestable y transitorio. Si la bomba o la planta están mal diseñadas o mal operadas, es posible encontrar estos regímenes [22].

El régimen estable

Aquí las cavidades que comienzan en el ojo del impulsor se desarrollan progresivamente a medida que viajan con el flujo hasta que colapsan en algún lugar a lo largo de las paletas. Dichos flujos, en una escala macro, son esencialmente estables y la presión de entrada de una bomba es constante [22].

El régimen inestable

Generalmente debido a una combinación de caudales muy bajos y NPSHd inadecuado. Se produce una fuerte recirculación dentro de la bomba y el trabajo de la tubería de entrada adyacente. La presión de entrada de la bomba en el régimen inestable mostrará impulsos periódicos [44].

El régimen transitorio

En ésta etapa el caudal se ha reducido hasta tal punto que poco o ningún flujo pasa realmente a través de la bomba. Toda la energía puesta en el fluido por el impulsor se traduce en pérdidas hidráulicas con un aumento de temperatura resultante. La expansión de volumen asociada con este aumento de temperatura está restringida y la presión de entrada se acumula. Sin embargo, el aumento de la temperatura hace que los procesos asociados con el crecimiento y colapso de la cavidad cambien considerablemente, y ahora dominan los cambios inducidos por la termodinámica [22].

2.10.4. Efectos que produce la cavitación

Los efectos que produce la cavitación están ligados con los síntomas que presenta y que se trataron con anterioridad, estos son: disminución del rendimiento y erosión.

2.10.5. Disminución del rendimeinto de la bomba

La presencia de burbujas de vapor en la entrada del impulsor debido a la caída de presión respecto a la presión parcial de vapor disminuye el espacio utilizable para el paso del líquido, se perturba la continuidad del flujo debido al desprendimiento de gases y vapores disueltos, esto provoca una disminución del caudal, la altura manométrica, el rendimiento de la bomba

perdiendo así sus caracteristicas óptimas para el funcionamiento como se observa en la Figura 19 [47].

En su recorrido las burbujas de vapor dañan los conductos de paso del líquido en el tubo de aspiración y llegan a una zona en el impulsor donde se supera a la presión de vapor, en la que, instantáneamente, toda la fase de vapor pasa a líquido, de forma que el volumen de las burbujas pasa a ser ocupado por el líquido, en forma violenta, que se acompaña de ruidos y vibraciones, esto compromete en un golpeteo sobre los alabes, que se transmite al eje, cojinetes, cierres mecánicos y demás componentes. Si la bomba funciona en estas condiciones durante cierto tiempo, puede reducir considerablemente su vida útil y colapsar [47].



Figura 19. Disminución brusca de las curvas caraterísticas por el efecto de la cavitación en una bomba centrífuga [49]

2.10.6. Erosión de los componentes de la bomba

El daño por cavitación es una forma especial de corrosión-erosión debido a la formación y al colapso de burbujas de vapor en un líquido cerca de una superficie metálica, que ocurre en turbinas hidráulicas, hélices de barcos, impulsores de bombas y otras superficies sobre las cuales se encuentran líquidos de alta velocidad con cambios de presión. Un daño por cavitación tiene un aspecto semejante a picaduras por corrosión, pero las zonas dañadas son más compactas y la superficie es más irregular en el caso de la cavitación[47].

2.10.7. La cavitación y la importancia del BEP

Toda bomba de fábrica proporciona curvas características que muestran el rendimiento en términos de caudal de descarga y cabeza de la bomba, ver Figura 20. Por lo general se incluye detalles de potencia y eficiencia. El BEP como se ha definido ya antes, es el punto de operación ideal de la bomba, es donde la capacidad de la bomba y el cabezal de la bomba se

combinan para brindar la máxima eficiencia de la bomba. Lejos de la BEP, la bomba estará sujeta a un mayor desgaste y una vida útil reducida. Típicamente, los datos de NPSH se proporcionarán en la presión de entrada de la bomba a la cual comienza a ocurrir una cavitación grave [22]. La cavitación a menudo comienza con una caída de aproximadamente 3% en la cabeza de BEP, pero este valor variará con las propiedades físicas del líquido que se bombea y la rugosidad de la superficie del equipo hidráulico en particular [48].



Figura 20. Detalle del punto de máxima eficiencia de una curva caudal - rendimiento

2.10.8. Monitoreo de la cavitación en bombas centrífugas

Existen varios signos que indican el inicio y el desarrollo de la cavitación en una bomba centrífuga. Se han realizado muchas investigaciones para detectar la cavitación en bombas de agua, hay dos formas diferentes de detectar el inicio de la cavitación en un líquido: el método analítico y el método de ingeniería [33].

En el método analítico o también conocido como método numérico se implementa comúnmente para predecir el inicio de la cavitación en una sola burbuja pero rara vez dentro de una bomba. Varios modelos se pueden usar para describir el fenómeno y comportamiento de los núcleos de cavitación pero no se ha desarrollado un algoritmo exacto que permita el cálculo de los parámetros de condición de la bomba, como la vibración, el ruido y la velocidad, que se pueden usar para indicar la cavitación [46].

El método de ingeniería es el método mas comúnmente aplicado para monitorear la cavitación en una bomba centrífuga. Al visulizar la Tabla 9, el Doctor Salem A. Alhashmi en su tesis titulada "Diagnostico y detección de cavitación en bombas centrífugas " detalla ocho métodos para determinar la cavitación en bombas centrifugas [33].

	Método	Descripción
1	Determinación de la NPSH	Según la norma ISO 3555, la determinación del NPSH a una velocidad y caudal constantes es el método de
		ingeniería más popular para controlar la cavitación en una
		bomba centrífuga. En este método, la cavitación se
		desarrolla completamente cuando el valor NPSH cae en
		un 3%.
		Consiste en colocar en la tubería de succión transparente
2	Visualización	para visulazar las burbuias de vapor en presencia de
		cavitación.
		Método simple que consiste en pintar las cuchillas y las
		cubiertas del impulsor. La extensión de la eliminación de la
3	Método de la erosión de la pintura	pintura indica el nivel de cavitación presente. El
		inconveniente principal en este método es encontrar una
		pintura adecuada con la adhesividad y sensibilidad
		correctas.
		Este método consiste en comparar la presión estática
4	Mediciones de presión estática	medida y la presión de vapor a una temperatura dada del
	1	fluio. Al estar el depósito de agua sometido a presiones
		estáticas muy bajas el riesgo de cavitación aumenta.
		En este método la señal de vibración se adquiere en la
		estructura de la bomba montando un transductor en la
		salida de la bomba cerca del agua de corte donde las
5	Método de vibración	burbujas se colapsan. La cavitación puede provocar una
		frecuencia de banda ancha. Este método también muestra
		frecuencias discretas y sus armónicos asociados en el
		espectro de vibración.
		La presencia de cavitación de una bomba puede ser
		escuchada en forma normal por el oído humano, sin
		embargo existe un método de análsis de monitoreo de
		condición que permite obtener parámetros que se pueden
6	Método de señales acústicas	interpretar mediante un transductor de sonido o llamado
		también micrófono.
		Este método, se basa en la medición de la presión del
		sonido, es simple y lógico; sin embargo, todavía no se usa
		en industrias debido a la dificultad de excluir la
		contaminación acústica.
		Se basa en mediciones de presión acústica, pero utiliza una
		banda de alta frecuencia (100 kHz - 1000 kHz). La ventaia

Tabla 9. Métodos de ingeniería para la detección de la cavitación

	Método	Descripción
		de este método sobre la vibración y los métodos acústicos
7	Método de emisiones acústicas	es su capacidad para detectar el inicio de la cavitación y,
		además, tiene la capacidad de determinar el mejor punto
		de eficiencia de una bomba.
		El método incluye el análisis de firma de corriente del
		motor y la velocidad angular instantánea. Se basa en el
8	Método de suministro de energía	principio de que durante la cavitación, la carga hidráulica
		en el motor disminuye, lo que provoca una disminución en
		la corriente de carga y un aumento en la velocidad del
		motor.

2.10.9. Métodos de prevención de cavitación

Existen varios métodos para evitar la cavitación, la mejor manera de hacerlo es con un buen diseño del sistema de bombeo con el fin de evitar en lo más posible bajas presiones sobre todo aquellas que estén por debajo del punto de vaporización. Dar un acabado de pulido a la superficie sujeta a efectos de cavitación es también una buena recomendación, ya que es más difícil implosionar burbujas sobre una superficie muy plana.

Otros métodos para evitar la cavitación se listan a continuación:

- Aumentar el diámetro de la tubería de aspiración para reducir la velocidad de aspiración.
- Disminuir la altura geométrica de aspiración.
- Cambiar a una bomba mayor a menor velocidad.
- Rebajar la temperatura del fluido bombeado.
- Emplear válvulas y tuberías de aspiración de bajo coeficiente de fricción.

En consecuencia la única manera en que las bombas centrífugas funcionen sin problema es que trabajen en una zona en donde la presión no este por debajo de la presión de vapor correspondiente a la temperatura del líquido [39].

2.11. Fallos en bombas centrífugas

2.11.1. Técnicas para identificar potenciales fallos

Para identificar problemas potenciales capaces de provocar la falla de la bomba, en este trabajo se utiliza el análisis del árbol de fallos o FTA por sus siglas en ingles *Fault tree analysis* y análisis de modo-efecto de falla, más conocido como FMEA por sus siglas en inglés *Failure*

Mode Effect Analysis. El FTA siempre complementa el FMEA y no al revés. Estas técnicas son ampliamente usadas en varios campos e industrias [49].

2.11.2. Árbol de fallos

El FTA presenta de forma lógica y gráfica varias combinaciones para posibles eventos que pueden conducir a un evento superior indeseado como la falla del equipo. El árbol muestra la relación de causa-efecto entre falla, fallo y las causas que contribuyen a estos [49]. Para construir el árbol de fallos es necesario identificar el evento final a ser analizado. Luego, usando los símbolos presentados en la Figura 21, identificar los eventos intermedios que conducen al evento final. En otras palabras, usando un razonamiento deductivo identificar los eventos que podrían causar el evento final.



Figura 21. Símbolos de conectores lógicos (izquierdo) y símbolos de eventos (derecha)

2.11.3. Análisis del árbol de fallos

El en diagrama de la Figura 22, se puede advertir como evento no deseado la falla de la bomba centrifuga, provocada por el fallo de impulsores, sello mecánico o rodamientos. La causa mas común de fallo es la erosión de material. También, todos los eventos básicos pueden disminuir el rendimiento o llevar a la falla del sistema. Más adelante, en los diagramas Ishikawa se detalla el origen de cada evento básico.



Evento Básico

Evento principal

- EB1 Erosión
- EB2 Bloqueo

- EB3 Desgaste
- EB4 Picadura
- EB5 Grieta
- EB6 Deslizamiento
- EB7 Rayado
- EB8 Manchas
- EB9 Desconchado
- EB10 Corrosión
- EB11 Ataque químico
- EB12 Deformación caras
- EB13 Tensión
- EB14 Fatiga
- EB15 Extrucción
- EB16 Fractura
- EB17 Compresión

- -----
- EP1 Fallo en impulsor
- EP2 Fallo en rodamiento pista interna y/o externa
- EP3 Fallo en sello mecánico
- EP4 Fallo en sello fijo y/o rotativo
- EP5 Fallo en muelle del sello mecánico
- EP6 Fallo en elastómero del sello mecánico

Evento Final

EF1 Falla de la bomba centrifuga

Figura 22. Análisis del árbol de fallos para la bomba centrífuga multietapa vertical

2.11.4. Análisis de modo efecto de falla

El análisis de modo y efecto de falla, más conocido como FMEA por sus siglas en inglés *Failure Mode Effect Analysis*, es un sistematizado grupo de actividades que intentan reconocer y evaluar los potenciales modos de falla en un producto o proceso, también identifica acciones que puedan eliminar o reducir la potencial probabilidad de ocurrencia de una falla. El FMEA es ampliamente usado en sectores de manufactura, tales como automóvil, aeroespacial, química. Los procedimientos básicos del FMEA involucran cuatro pasos.

- Revisar el proceso y listar los potenciales modo de falla del proceso o sistema.
- Asignar una calificación de severidad, ocurrencia y detención para cada modo potencial de falla.
- Calcular número de prioridad de riesgo o NPR por sus siglas en inglés Risk Priority Number: el NPR es calculado como el producto de la severidad, ocurrencia y detección.
- Identificar los modos críticos de falla (valores más altos de RPN) y sus correspondientes causas para luego dar prioridad en las acciones de remedio.

2.11.5. Calificación de severidad, ocurrencia y detección para una bomba centrífuga multietapa vertical

Según D. H. Stamitis, en su libro "Failure Mode and Effect Analysis – FMEA from theory to Execution". Las pautas de calificación no son universales, por el contrario, cada producto, sistema y organización tiene guías propias que reflejan sus necesidades [49].

Generalmente, una guía de calificación puede formularse de dos formas – cualitativa y cuantitativa. En cualquier caso, los valores numéricos pueden ser de 1 a 5 o 1 a 10, el rango más común es de 1 a 10 [49]. Para propósitos de evaluar la severidad, ocurrencia y detección se puede seguir de la Tabla 10, a la Tabla 12.

Del árbol de fallos y bibliografía se deduce que los elementos mecánicos mas críticos son: impulsores, sello mecánico y rodamientos. Por lo tanto, son considerados para el análisis FMEA. En la Tabla 13, se muestra el FMEA de la bomba centrifuga multietapa.

En la Tabla 13, se han ponderado del 1 al 10, según los tres factores de riesgo, cada modo de fallo identificado en el análisis FMEA de la bomba. El RPN más alto es para el sello mecánico, dado que un fallo incipiente en algún elemento del sello es complicado detectar con métodos tradicionales de monitoreo de la condición. En segundo y tercer lugar se hallan rodamientos e impulsores.

Efecto	Rango	Descripción
No	1	No efecto
Muy leve	2	Muy leve efecto en el producto o sistema
Leve	3	Leve efecto en el producto o sistema
Menor	4	Menor efecto en el producto o sistema
Moderado	5	Moderado efecto en el producto o sistema
Significante	6	Caída de rendimiento. Fallo parcial pero operable
Mayor	7	Rendimiento severamente afectado pero funciona y seguro
Extremo	8	Producto inoperable pero seguro
Serio	9	Peligro potencial, falla inminente
Peligro	10	Efecto peligroso, seguridad comprometida

Tabla 10. Guía para calificar la severidad [51]

Tabla 11. Guía para calificar la ocurrencia [51]

Detección	Rango	Descripción
Casi nunca	1	Fallo improbable. Historial no muestra fallos
Remoto	2	Raro número de fallos probables
Muy leve	3	Muy pocos fallos probables
Leve	4	Pocos fallos probables
Bajo	5	Ocasional número de fallos probables
Intermedio	6	Número intermedio de fallos probables
Moderadamente alto	7	Número moderadamente alto de fallos probables
Alto	8	Número alto de fallos probables
Muy alto	9	Muy alta probabilidad de fallos
Casi seguro	10	Fallo casi seguro. Existe historial de fallos

Tabla 12. Guía para calificar la detección [51]

Detección	Rango	Descripción			
Casi seguro	1	Controles actuales casi siempre detectaran el fallo			
Muy alto	2	Muy alta probabilidad que los actuales controles detectaran el fallo			
Alto	3	Buena probabilidad que los actuales controles detectaran el fallo			
Moderadamente alto	4	Moderadamente alta probabilidad que los actuales controles			
		detectaran el fallo			
Medio	5	Media probabilidad que los actuales controles detectaran el fallo			
Bajo	6	Baja probabilidad que los actuales controles detectaran el fallo			
Leve	7	Leve probabilidad que los actuales controles detectaran el fallo			
Muy leve	8	Muy leve probabilidad que los actuales controles detectaran el fallo			
Remoto	9	Remota probabilidad que los actuales controles detectaran el fallo			
Casi imposible	10	no se conoce de controles disponibles para detectar el fallo			

Componente	Causa potencial del fallo	Modo potencial del fallo	Efecto potencial del fallo	Severidad	Ocurrencia	Detección	RPN
Sello mecánico	Altas temperaturas Vibración	Rotura	Perdida de eficiencia y presión Vibración excesiva	10	9	5	450
Rodamientos	Altas temperaturas Vibración	Fractura y agrietamiento	Aumento consumo de potencia eléctrica Vibración excesiva Reducción de eficiencia y caudal	9	7	5	315
Impulsores	Cavitación	Erosión	Reducción de eficiencia, caudal y presión Vibración excesiva (desbalanceo)	9	5	5	225

Tabla 13. Análisis de FMEA para la bomba centrifuga multietapa vertical

2.12. Fallos en sello mecánico

2.12.1. Revisión bibliográfica en construcción de fallos en el sello mecánico

De acuerdo al análisis FMEA, el sello mecánico es un elemento crítico. En la Tabla 14, se presenta un resumen de fallos estudiados en sellos mecánicos por diferentes investigaciones enfocadas al MC. Donde los principales puntos a tomar en cuenta son: nombre del fallo, causas y efectos del fallo, métodos de construcción para inducir artificialmente el fallo, así como sus niveles de severidad.

2.12.2. Análisis causa-raíz para simular fallo en sello mecánico

En la Figura 23, se muestra el funcionamiento del sello mecanico. 1) Junta tórica: cumple la functión de elemento de sellado secundario. 2) Cara estacionaria: se monta en la carcasa de la bomba, puede sellarse con una junta tórica fijada entre la parte estacionaria y la carcasa de la bomba. 3) La parte giratoria del sello se sella en el eje, por lo general, esta parte del cierre gira con el eje. 4) Sello secundario: se denomina elemento de sellado secundario porque su trayectoria de fuga debe ser secundaria a la fuga en la cara del sello, la carga por medio de un sistema hidráulico o fuerza mecánica hace que el cierre secundario quede hermético en su área de confinamiento. 5) Muelles: en cada cierre mecánico siempre es necesario mantener las caras cerradas incluso en ausencia de presión hidráulica, la carga por resorte sirve para acomodar cualquier desviación pequeña del eje, el movimiento del eje debido a las tolerancias de los rodamientos y la alineación fuera de la perpendicular debido a las tolerancias de fabricación. 6) Carcasa: mantiene unidos a los demás componentes en la relación deseada. En la Figura 24, se presenta el diagrama Ishikawa de las causas que pueden conducir al fallo del sello mecánico. Por ejemplo, la precensia de partículas abrasivas (suciedad) en el líquido bombeado erosionan las caras del sello estatico o móvil. Si la bomba opera en vacio, genera extremas temperaturas en el sello mecánico, ocasionanado grietas por calor o agrietar los anillos elastomericos [50], [51].



Figura 23. Funciones de cada componente del sello mecánico



Figura 24. Diagrama Ishikawa para el sello mecánico

Referencia	Nombre fallo	Causa/s	Efecto/s	Imagen	Método constructivo	Severidad dimensiones
Vibration based fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using decision tree [26]	Rotura	Fricción seca Lubricante inadecuado Mala instalación	Bajo rendimiento Fuga		Martilleo	1 severidad grave Fractura total
Soft computing approach to fault diagnosis of centrifugal pump [52]	Rotura	Friccion seca Mal lubricante Extrema presión durante instalación	Ruido Fugas Alta vibración		Martilleo	1 severidad Fractura
Tribological behaviour diagnostic and fault detection of mechanical seals based on acoustic emission measurements [53]	Rotura resorte	Fatiga Corrosión	Bajo rendimiento Fuga			1 severidad grave: fueron removidos 2 resortes de los 12
Modelling acoustic emissions generated by tribological behaviour of mechanical seals for condition monitoring and fault detection [54]	Grieta	Fricción seca Erosión Corrosión	Bajo rendimiento Fuga		Agrietamiento con repasador de diamante	2 severidades Leve: 6mm longitud grieta Grave: 7x8 mm desprendimiento

Tabla 14. Revisión bibliográfica de fallos en sellos mecánicos

2.12.3. Fallos propuestos en sello mecánico

En la Tabla 15, se presenta el sello mecánico fijo en buena condición, una severidad de erosión radial y una falla de resorte por fatiga.



Tabla 15. Fallos propuestos en sello mecánico por grieta y rotura

2.13. Fallos en impulsor

2.13.1. Revisión bibliográfica sobre construcción de fallos en impulsor

En la Tabla 16, se presenta un resumen de fallos estudiados en impulsores por diferentes investigaciones enfocadas al MC de bombas centrifugas. Donde los principales puntos a tomar en cuenta son: nombre del fallo, causas y efectos del fallo, métodos de construcción para inducir artificialmente el fallo, así como sus niveles de severidad.

2.13.2. Análisis causa-raíz para simular fallo en el impulsor

La cavitación, por ejemplo, es prodructo de una baja presión en la succión, cuya característica es la erosión en la entrada del álabe. Si la cavitación es por recirculación en la descarga, generalmente hay erosión en la punta de los alabes [55]. La Figura 25, muestra la dirección del fluido en el interior del impulsor, también las dimensiones en milímetros.

La Figura 26 presenta el diagrama Ishikawa, de este diagrama se puede dedudir que el fallo mas habitual es erosión de los alabes causada por cavitación en la succión o descarga.



Figura 25. Dimensiones del impulsor



Figura 26. Diagrama Ishikawa para el impulsor

Tabla 16. Revisión bibliográfica de fallos en impulsores

Referencia	Nombre fallo	Causa/s	Efecto	Imagen	Método constructivo	Severidad y dimensiones
Vibration based fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using decision tree [26]	Erosión	 Corrosión Fluido con impuresas Cavitación 	 Alta vibración Aumento ruido Baja presión Bajo rendimiento Fatiga en eje, sello mecánico y rodamientos 			Porción removida del impulsor Revoluciones: 2880rpm Incremento flujo: 40,50,60,70,80 y 90 l/s
Intelligent Diagnosis Method for Centrifugal Pump System Using Vibration Signal and Support Vector Machine [56]	Erosión	 Corrosión Fluido con impuresas Cavitación 	 Alta vibración Aumento ruido Baja presión Bajo rendimiento Fatiga en eje, sello mecánico y rodamientos 	Accelorometer		Tres niveles de severidad: Porciones removidas del impulsor Leve 25mm ² Medio 100mm ² Grave 225mm Revoluciones: 3500rpm
Artificial neural network based classification of faults in centrifugal water pump [57]	Erosión	 Corrosión Fluido con impuresas Cavitación 	 Alta vibración Aumento ruido Baja presión Bajo rendimiento Fatiga en eje, sello mecánico y rodamientos 		Mecanizado por fresadora.	Leve: escaso material romovido Velocidad: 1450 rpm
Diagnosis of Impeller Faults in a Centrifugal Pump Based on Spectrum Analysis of Vibration Signal Abdulrahman Al- braik [58]	Erosión	 Corrosión Fluido con impuresas Cavitación 	 Alta vibración Ruido Baja presión Bajo rendimiento Fatiga en eje, sello mecánico y rodamientos 	PARTS FOR THE PARTS		Cinco severidades en los alabes: 3 mm removidos de los alabes de a uno en cada prueba Revoluciones: 2900 rpm Incremento flujo: 50, 100, 150, 200, 250 300 and 340 l/min

Referencia	Nombre fallo	Causa/s	Efecto	Imagen	Método constructivo	Severidad y dimensiones
A new method of vibration analysis for the diagnosis of impeller in a centrifugal pump [59]	Erosión	 Corrosión Fluido con impuresas Cavitación 	 Alta vibración Ruido Baja presión Bajo rendimiento Fatiga en eje, sello mecánico y rodamientos 	() cover board damase	kefects	Dos severidades de erosión: Bordes removidos en el ojo del impulsor Bordes removidos en la salida del impulsor Revoluciones: 2900 rpm Incremento de flujo: de 1001/min a 3501/min en intervalos de 50
A fault diagnosis scheme for rotating machinery using hierarchical symbolic analysis and convolutional neural network [60]	Erosión	 Corrosión Fluido con impuresas Cavitación 	 Alta vibración Aumento ruido Baja presión Bajo rendimiento Fatiga en eje, sello mecánico y rodamientos 	(h) inpeller blade	e damage	Una severidad en plato lateral y una severidad en alabe: Porciones removidas del impulsor Revoluciones: 2030, 2320, 2610 y 2900 rpm
Vibration Based Multi Fault Diagnosis for Centrifugal Pumps Berli Paripurna Kamiel [61]	Grietas	Cavitación	Baja presión Bajo caudal	Artificial faults		Corte en aspas del impulsor
Impeller fault detection under variable flow conditions based on three feature extraction methods and artificial neural networks [62]	Grietas	- Corrosión - Fluido con impuresas	 Alta vibración Ruido Baja presión Bajo rendimiento Fatiga en eje, sello mecánico y rodamientos 	Crack length	Arco de sierra	Tres severidades por grieta y desbalanceo: Logitud de la grieta: 10, 20, 30mm Profundidad desbalanceo: 4, 8, 12mm Revoluciones: 2700rpm Incremento flujo: de 0 a 901/min

Referencia	Nombre fallo	Causa/s	Efecto	Imagen	Método constructivo	Severidad y dimensiones
Multi Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps with Time, Frequency and Wavelet-Based Features Using Support Vector Machines [63]	Grietas	 Corrosión Fluido con impuresas Cavitación 	 Alta vibración Ruido Baja presión Bajo rendimiento Fatiga en eje, sello mecánico y rodamientos 	(c) Pitte	Mecanizado por fresadora.	Test 1: severidad en alabes y plato lateral: Muescas en los alabes Picaduras en plato lateral Velocidades: 1800, 2100, 2400, 2700, 3000, 3300, 3600, 3900 rpm
Sensorless detection of impeller cracks in motor driven centrifugal pumps [64]	Grietas	 Corrosión Fluido con impuresas Cavitación 	 Alta vibración Ruido Baja presión Bajo rendimiento Fatiga en eje, sello mecánico y rodamientos 	Dime 1mr	nsiones grieta m – Mecanizado J por fresadora.	Seis severidades Test uno: 1 grieta Test dos: 2 grietas Test tres: 3 grietas Test cuatro: 4 grietas Test cinco: 6 grietas Test seis: 10 grietas
Diagnosis of Centrifugal Pump Faults Using Vibration Methods [65]	Bloqueo	Objetos solidos en el fluido bombeado	Alta vibración Ruido Baja presión Bajo rendimiento.		Golpe de martillo	Cinco severidades: Test 1: 3.2mm Test 2: 2.4mm Test 3: 0.7mm Test 4: 0.3mm Test 5: 2.6- 2.9- 3 mm Revoluciones: 2900 rpm Incremento de flujo: de 501/min a 3501/min en intervalos de 50
Clogged Impeller Diagnosis in the Centrifugal Pump Using the Vibration and Motor Current Analysis [66]	Bloqueo	Fluido con impuresas	 Alta vibración Ruido Baja presión Bajo rendimiento Fatiga en eje, sello mecánico y rodamientos 	Sealing tape	Vanes Teflón Suction Eye	Una severidad: Un pasaje del impulsor es bloqueado totalmente con cinta teflón Velocidad: 2940 rpm
Vibration based centrifugal pump fault diagnosis based on modulation signal bispectrum analysis[67]	Bloqueo	Fluido con impuresas	 Alta vibración Ruido Baja presión Bajo rendimiento Fatiga en eje, sello mecánico 		Teflón	Dos severidades de bloqueo: -Un pasaje parcialmente bloqueado -Un pasaje totalmente bloqueado Revoluciones: 2900 rpm Incremento de flujo: de 50l/min a 400l/min en intervalos de 50

2.13.3. Niveles de severidad por picadura en la entrada de los alabes del impulsor

La severidad del fallo se determina mediante la regla de tres entre el volumén removido y el volumén medio de un solo álabe, se considera el volumen medio en la entrada del álabe. En la Tabla 17, se muestra los niveles de fallo y su correspondiente severidad.

Los datos de la Tabla 17, son presentados de forma grafica en la Figura 27. La grafica muestra un comportamiento creciente. Por ejemplo, el nivel 2 (cinco agujeros de diametro 1,5 mm) tiene un 12% de fallo, el nivel 6 (seis agujeros de diametro 2,25 mm) tiene un 41% de fallo y el nivel mas grave (siete agujeros de diametro 3mm) tiene un 69% de fallo.

Nivel	Agujeros	Diametro agujero Ø mm	Porcentaje fallo %	Severidad
0	0	0	0	Sano
1	5	1	5	Leve
2	5	1,5	12	Leve
3	5	1,75	17	Leve
4	5	2	22	Leve
5	6	2	31	Moderado
6	6	2,5	41	Moderado
7	7	2,5	48	Moderado
8	6	2,5	55	Grave
9	7	2,5	61	Grave

Tabla 17. Severidad de la picadura en la entrada del álabe

Severidad en la entrada de los álabes



Figura 27. Evolución del fallo por picadura en la entrada de un solo álabe

2.13.4. Fallos propuestos en la entrada del impulsor

En base a la bibliográfia de la Tabla 17, se propone inducir fallos por picadura conocido también como erosión producto de la implosión de burbujas como producto de la cavitación. La Tabla 18, muestra los fallos en la entrada del impulsor, su construcción mediante un proceso de electroerosión.

Severidad	Figura	Dimensiones (mm)
0% Sano		-Diámetro agujeros 0mm -Total agujeros 0
12% Leve		-Diámetro agujeros 1,5mm -Total agujeros 30 -5 agujeros por álabe
17% Leve		-Diámetro agujeros 1,75 -Total agujeros 30 -5 agujeros por álabe
22% Leve		-Diámetro agujeros 2 mm -Total agujeros 30 -5 agujeros por álabe
31% Moderado	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	-Diámetro agujeros 2mm -Total agujeros 42 -7 agujeros por álabe

Tabla 18. Fallos en impulsor – erosión por cavitación



2.13.5. Niveles de severidad por picadura en la salida del álabe

En la Tabla 19 se muestra los niveles de fallo y su correspondiente severidad. Los datos de son presentados de forma grafica en la Figura 28. La grafica muestra un comportamiento creciente. Por ejemplo, el nivel 2 (cinco agujeros de diametro 1,5 mm) tiene un 12% de severidad de fallo, el nivel 6 (seis agujeros de diametro 2,5 mm) tiene un 41% de fallo y el nivel más grave (nueve agujeros de diametro 2,5mm) tiene un 61% de fallo.

Nivel	Agujeros	Diametro agujero Ø mm	Porcentaje fallo %	Severidad
0	0	0	0	sano
1	5	1	5	Leve
2	5	1,5	12	Leve
3	5	1,75	17	Leve
4	5	2	22	Leve
5	6	2	31	Moderado
6	6	2,5	41	Moderado
7	7	2,5	48	Moderado
8	8	2,5	55	Grave
9	9	2,5	61	Grave

Tabla 19. Severidad de la picadura en la salida del álabe



Figura 28. Evolución del fallo por picadura en la salida de un álabe

2.13.6. Fallos propuestos en la salida del impulsor

Al igual que la construcción de fallo en la entrada del impulsor el proceso de mecanizado se da por electroerosión. La Tabla 20 muestra los fallos en impulsor por cavitación.



Tabla 20. Fallos en impulsor - erosión por cavitación



2.13.7. Niveles de severidad por bloqueo en los canales del impulsor

La severidad por bloqueo se determina mediante la regla de tres entre el número total de canales de un solo impulsor y los canales bloqueados del mismo. En la Figura 29, se muestra de forma grafica la Tabla 21, donde se observa la tendencia creciente que tiene el fallo por bloqueo.

Niveles	Canales Bloqueados	Porcentaje fallo %
1	0	0
2	0,5	8
3	1	17
4	1,5	25
5	2	33
6	2,5	42
7	3	50
8	3,5	58
9	4	67
10	4,5	75
11	5	83
12	5,5	92
13	6	100

Tabla 21. Severidad del bloqueo en los canales del impulsor


Figura 29. Evolución del fallo por bloqueo del impulsor

En la Tabla 22, se presenta los fallos por bloqueo a ser estudiados. Los canales son bloqueados con silicona para simular el bloqueo por cuerpos extraños como cinta teflón, piedras.



Severidad	Figura	Número de canales
0		
17%		1 canal
33%		2 canales
50%		3 canales

Severidad	Figura	Número de canales
67%		4 canales
83%		5 canales
100%		6 canales

2.13.8. Severidad por desbalanceo del impulsor

La severidad por desbalanceo se determina mediante la regla de tres entre el volúmen removido y el volúmen total de la cubierta frontal del impulsor. Los datos de la Tabla 23, se muestran de forma grafica en la Figura 30. Por ejemplo, remover 21,2 milimetros cúbicos representa un 0,6% de fallo, remover 547,2 milímetros cúbicos representa un 15% de fallo y representa un fallo grave.

La Tabla 24, expone los fallos propuestos por desbalanceo como resultado de la erosión por cavitación.

Niveles	Dimensiones de volumen	Volumen	Porcentaje
	removido (mm)	removido	fallo %
		mm^3	
0	0x0mm	0	0
1	5x5mm	10,6	0,3
2	7x7mm	21,2	0,6
3	9x9mm	35,8	1,0
4	10x10mm	44,6	1,2
5	12x12mm	65,7	1,8
6	14x14mm	91,2	2,5
7	14x14mm / 5x5mm	101,8	2,8
8	14x14mm / 7x7mm	112,4	3,1
9	14x14mm / 9x9mm	127,0	3,5
10	14x14mm / 10x10mm	135,9	3,8
11	14x14mm / 12x12mm	156,9	4,4
12	14x14mm / 14x14mm	182,5	5,1
14	(3) 14x14mm	273,7	7,6
15	(4) 14x14mm	364,8	10,2
16	(5) 14x14mm	456	12,7
17	(6) 14x14mm	547,2	15,2

Tabla 23. Severidad para desbalanceo de la cubierta frontal del impulsor

Nivel de severidad vs Porcentaje fallo



Figura 30. Evolución del fallo por desbalanceo de la cubierta frontal



Tabla 24. Fallo propuesto por desbalanceo como resultado de la erosión por cavitación



2.14. Fallos en rodamientos

2.14.1. Revisión bibliográfica en construcción de fallos en rodamientos

En la Tabla 25, se presenta un resumen de fallos estudiados en pista interna, externa y elementos rodantes, por diferentes investigaciones enfocadas al MC de maquinas rotativas. Donde los principales puntos a tomar en cuenta son: nombre del fallo, causas y efectos del fallo, métodos de construcción para inducir artificialmente el fallo, así como sus niveles de severidad y dimensiones. En la Figura 31, se muestra el rodamiento 1205 donde se inducirá los fallos.



Figura 31. Rodamiento 1205 para la experimentación

2.14.2. Análisis causa-raíz de principales fallos en rodamientos

Las diferentes causa-raiz que llevan al fallo de rodamiento se muestran en la Figura 33. Por ejemplo, la pista exterior puede ser afectada por desgaste, grietas, picaduras, desprendimientos. Generalmente, hay tres tipos de fallo por fatiga: picadura por fatiga *pitting*, desprendimiento por fatiga *spalling* y desgaste de las superficies [68], [69].

Las picaduras "*pittting*" aparecen como cráteres poco profundos en las superficies de contacto con una profundidad (aproximadamente $10\mu m$) como se muestra en la Figura 32. El desprendimiento por fatiga *spalling* tiene cavidades más profundas en las superficies de contacto con una profundidad de 20–100 µm [68].



Figura 32. Spalling y pitting [68]



Figura 33. Diagrama Ishikawa para fallos en rodamiento

Tabla 25. Revisión bibliográfica de fallos inducidos en rodamientos de bolas

Referencia	Fallos	Causas	Efectos	Imagen fallo/rodamiento	Método construcción	Severidad y dimensiones
Incipient bearing fault diagnosis using DWT for feature extraction [70]	Picadura " <i>pitting</i> "	 Fatiga Escombros atrapados en el lubricante Humedad Pobre lubricación 	- Alta vibración - Aumento ruido - Aumento temperatura		Electroerosión	Una severidad: Picadura con Ø2mm Profundidad < 0,5mm / estimado Rodamiento: FAG 7206 B Revoluciones: 600 rpm
Análisis de vibraciones para detección temprana de fallas en cojinetesde tipo anti-friccion [71]	Picadura "pitting"	 Fatiga Escombros atrapados en el lubricante Humedad Pobre lubricación 	- Alta vibración - Aumento ruido - Aumento temperatura		Electroerosión	Tres severidades en cada elemento:Pista interna.Ø 0.8, 1.5 y 2mmPista externa:Ø 0.8, 1.5 y 2mmElemento rodante:Ø 0.8, 1.5 y 2mmRevoluciones:1750rpmProfundidad:0.35mmRodamiento de bolas E 20
Compound gear- bearing fault feature extraction using statical features based on time frecuency method [72]	Picadura "pitting"	 Fatiga Escombros atrapados en el lubricante Humedad Pobre lubricación 	 Alta vibración Aumento ruido Aumento temperatura 		Eletroerosión	Una severidad en cada elemento: Pista interna. Ø 0.8 mm Pista externa: Ø 0.8 mm Profundidad: agujero pasante / estimando Rodamiento de bolas 6004
Research on variational mode decomposition in rolling bearings fault diagnosis of the multistage centrifugal pump [73]	Picadura "pitting"	 Fatiga Escombros atrapados en el lubricante Humedad Pobre lubricación 	 Alta vibración Aumento ruido Aumento temperatura. Falla bomba multietapa 		Eletroerosión	Dos severidades en cada elemento: Pista interna Ø 0.1mm, Ø 0.3mm Pista externa Ø 0.1mm, Ø 0.3mm Elemento rodante Ø 0.1mm, Ø 0.3mm Revoluciones: 1750 y 2960 rpm Profundidad: no menciona Rodamiento: SKF6312

Referencia	Fallos	Causas	Efectos	Imagen fallo/rodamiento	Método construcción	Severidad y dimensiones
A fault diagnosis scheme for rotating machinery using hierarchical symbolic analysis and convolutional neural network[60]	Picadura " <i>pitting</i> "	 Fatiga Escombros atrapados en el lubricante Humedad Pobre lubricación 	- Alta vibración - Aumento ruido - Aumento temperatura	(d) inner race corrosive pitting	(b) outer race corrosive pitting	Cuatro severidades: Pista interna \emptyset 0.17, \emptyset 0.35, \emptyset 0.53 y \emptyset 0.71mm Pista externa \emptyset 0.17, \emptyset 0.35 y \emptyset 0.53mm Rodante \emptyset 0.17, \emptyset 0.35, \emptyset 0.53 y \emptyset 0.71mm Profundidad < 0,5mm / estimado Revoluciones: 2030, 2320, 2610 y 2900 rpm Rodamiento: 6205-2RS JEM SKF
An improved envelope detection method using particle swarm optimisation for rolling element bearing fault diagnosis [74]	Picadura " <i>pitting</i> "	 Fatiga Escombros atrapados en el lubricante Humedad Pobre lubricación 	- Alta vibración - Aumento ruido -Aumento temperatura	\bigcirc	Electroerosión	Tres severidades en cada elemento: Pista interna Ø 0.17mm, Ø 0.35mm, Ø 0.53mm Pista externa Ø 0.17mm, Ø 0.35mm, Ø 0.53mm Bola Ø 0.17mm, Ø 0.35mm, Ø 0.53mm Profundidad: 0.27 mm Rodamiento: 6205-2RS JEM Revoluciones: 1797, 1772, 1750 y 1730 rpm
A statistical feature investigation of the spalling propagation assessment for a ball bearing [75]	Picadura "pitting"	 Fatiga Escombros atrapados en el lubricante Humedad Pobre lubricación 	- Alta vibración - Aumento ruido - Aumento temperatura	Raceway Spalling	Electroerosión	Cuatro severidades en cada elemento: Pista interna Ø 0.1778, 0.3556, 0.5334,0.7112 mm Pista externa Ø 0.1778, 0.3556, 0.5334,0.7112 mm Bola Ø 0.1778, 0.3556, 0.5334,0.7112 mm Rodamiento de bolas 6205-2rs Revoluciones: 1797, 1772, 1750 y 1730 rpm
Detection of Combined Gear- Bearing Fault in Single Stage Spur Gear Box Using Artificial Neural Network [76]	Picadura " <i>pitting</i> "	 Fatiga Escombros atrapados en el lubricante Humedad Pobre lubricación 	- Alta vibración - Aumento ruido - Aumento temperatura		Electroerosión	1 severidad Pista externa agujero Ø 0.8mm Profundidad: agujero pasante / estimando Rodamiento de bolas 6004 Velocidad 1000 rpm
An adaptive sensitive frequency band selection method for empirical wavelet transform and its application in bearing fault diagnosis [77]	Picadura "pitting"	 Fatiga Escombros atrapados en el lubricante Humedad Pobre lubricación 	- Alta vibración - Aumento ruido - Aumento temperatura		Electroerosión	1 severidad en la pista externa Agujero Ø 2.2mm Profundidad 1mm Rodamiento bolas angular 7028AC Velocidad 1500 rpm

Referencia	Fallos	Causas	Efectos	Imagen fallo/rodamiento	Método construcción	Severidad y dimensiones
Vibration response characterisation and fault-size estimation of spalled ball bearings [69]	Desprendimiento "spalling"	 Sobrecarga Excesiva precarga Excesivo ajuste Fin vida until fatiga 	-Incremento de la vibración	A Width + Spall Inner Race	B Width Outer Race Electrocerosión	Cuatro severidade en pista interna y 5 externas: Pista interna anchos: 1.2, 1, 2.1, 3.8 mm Pista externa anchos: 0.6, 1.2, 1.4, 2.4 y 4 mm Profundidad < 0,5mm / estimado Rodamiento: QJ212TVP Revoluciones: 500, 800 y 1200 rpm
Vibration signal processing for spall size estimation in Rolling element bearing using autoregressive inverse filtration combined with bearing signal synchronous [78]	Desprendimiento "spalling"	- Sobrecarga - Excesiva precarga - Excesivo ajuste - Fin vida until de fatiga	-Incremento de la vibración		Electroerosión	Tres severidades: Longitud desprendimiento 1 0.25 mm Longitud desprendimiento 2 4.2mm Longitud desprendimiento 3 6.2mm Profundidad: 0.1mm Rodamiento: Revoluciones: 7700 rpm
Bearing fault detection and fault size estimation using fiberoptic sensors [79]	Desprendimiento "spalling"	- Sobrecarga - Excesiva precarga - Excesivo ajuste - Fin vida until de fatiga	-Incremento de la vibración		Electroerosión	Cuatro severidades en pista externa y tres en pista interna: Anchos pista externa: 0.39, 0.61, 1.12 y 1.64 mm Anchos en pista interna: 1.47, 2.63 y 4 mm Profundidad varia, el elemento rodante no tiene contacto con la superficie del fallo. Rodamiento: SKF 6208 ETN9 Revoluciones: 1200, 3400 y 3600 rpm
Reconstruction of angular speed variations in the angular domain to diagnose and quantify taper roller bearing outer race fault [80]	Desprendimiento "spalling"	 Sobrecarga Excesiva precarga Excesivo ajuste Fin vida until de fatiga 	-Incremento de la vibración		Electroerosión	3 severidades en pista externa: Ancho 1.6, 2, 3.31 mm Profundidad < 0,3mm / estimado Rodamiento SNR 32005 V Revoluciones 573 rpm

Referencia	Fallos	Causas	Efectos	Imagen fallo/rodamiento	Método construcción	Severidad y dimensiones
Application of CSA-VMD and optimal scale morphological slice bispectrum in enhancing outer race fault detection of rolling element bearings [81]	Desprendimiento " <i>spalling</i> "	- Sobrecarga - Excesiva precarga - Excesivo ajuste - Fin vida until de fatiga	-Incremento de la vibración			1 severidad en pista interna y externa Pista interna: ancho 0.2 mm Pista externa: ancho 0.2 mm Profundidad: 1.5mm Rodamiento de bolas LYC6205E Velocidad: 1470 rpm
Vibration response of spalled rolling element bearings: Observations, simulations and signal processing techniques to track the spall size [68]	Desprendimiento " <i>spalling</i> "	 Exesiva carga Aumento de tremperatura Mala lubricación Exesivo ajuste entre eje y rodamiento 	- Alta vibración - Aumento ruido - Fuga lubricante - Aumento temperatura	Electroerosion	Electroerosión	Dos severidades en pista interna y externa: Pista interna anchos: 0.6 y 1.1 mm Pista externa anchos: 0.6 y 1.2 mm Profundidad: 0.02 < depth < 0.1 mm Rodamiento: NACHI 2206GK Revoluciones: 800, 1200, 1600 y 2400 rpm
Radial Ball Bearing Inner Race Defect Width Measurement using Analytical Wavelet Transform of Acoustic and Vibration Signal [82]	Desprendimiento " <i>spalling</i> "	 Exesiva carga Aumento de tremperatura Mala lubricación Exesivo ajuste entre eje y rodamiento 	- Alta vibración - Aumento ruido - Fuga lubricante - Aumento temperatura		Electroerosión	Una severidad en pista interna dirección axial: Ancho de "spall": 2.1mm Profundidad de "spall": 1mm Rodamiento de bolas: 6206 Revoluciones: 1500 rpm
Quantifying bearing fault severity using time synchronous averaging jerk energy [83]	Desprendimiento " <i>spalling</i> "	 Exesiva carga Aumento de tremperatura Mala lubricación Exesivo ajuste entre eje y rodamiento 	- Alta vibración - Aumento ruido - Fuga lubricante - Aumento temperatura	Faut	t hent D1 D2 Herramienta de fresado	Tres severidades en pista interna y externa: Interna: D1: 1.6, D2: 2.6, profundidad:0.05mm D1: 2.7, D2: 4.4, profundidad:0.15mm D1: 4.4, D2: 6.8, profundidad:0.40mm Externa: D1: 1.4, D2: 2.6, profundidad:0.05mm D1: 2.4, D2: 4.4, profundidad:0.15mm D1: 4,0 D2: 6.8, profundidad:0.40mm Rodamiento: FAG QJ212TVP Revoluciones: 500 y 60 rpm

Referencia	Fallos	Causas	Efectos	Imagen fallo/rodamiento	Método construcción	Severidad y dimensiones
A fault diagnosis scheme for rotating machinery using hierarchical symbolic analysis and convolutional neural network [60]	Grieta	 Exesiva carga Aumento de tremperatura Mala lubricación Exesivo ajuste entre eje y rodamiento 	- Alta vibración - Aumento ruido - Fuga lubricante - Aumento temperatura	(c) inner race crack	(a) outer race erack	Una severidad en pista interna y externa: Pista interna 0.5mm ancho grieta Pista externa 0.5mm ancho grieta Profundidad: la grieta atraviesa las pistas Revoluciones: 2030, 2320, 2610 y 2900 rpm Rodamiento: 6205-2RS JEM SKF
Application of Zhao-Atlas-Marks Transforms in Non-Stationary Bearing Fault Diagnosis[84]	Grieta	 Exesiva carga Aumento de tremperatura Mala lubricación Exesivo ajuste entre eje y rodamiento 	- Alta vibración - Aumento ruido - Fuga lubricante - Aumento temperatura			1 severidad en cada pista: Pista interna (depth): 0,4mm Pista externa (depth): 0,4mm Rodamiento SKF-6000 Velocidad 2710 rpm
Time–frequency analysis for bearing fault diagnosis using multiple Q- factor Gabor wavelets[85]	Grieta	 Exesiva carga Aumento de tremperatura Mala lubricación Exesivo ajuste entre eje y rodamiento 	- Alta vibración - Aumento ruido - Fuga lubricante - Aumento temperatura		Electroerosión	1 severidad en pista externa Ancho grieta 0.6mm Profundidad: la grieta atraviesa las pistas Rodamiento HRB6304 Velocidad 1852rpm
Experimental Investigation for Distributed Defects in Ball Bearing using Vibration Signature Analysis[86]	Alta rugosidad	 Manofactura defectuosa Mala instalación Desgaste abrasivo 	-Alta vibración			3severidad de rugosidad Test 1: 2.926 μm Test 2: 4.292 μm Test 3: 5.013 μm
Bearing fault detection in a 3 phase induction motor using stator current flow [87]	Fallo jaula	Falla lubricante Desgaste Desprendimiento Uso largo plazo	Falla del sistema mecanico - Alta vibración		Herramienta de fresado	1 severidad para cada fallo Ancho fallo < 1mm/ estimado Velocidd 1435 rpm Rodamiento bolas SKF 6206ZZ

2.14.3. Severidad para fallos en pista interna

Para determinar la severidad del fallo en pista interna, se utiliza la regla de tres simple, donde se considera el nivel 7 como el fallo mas grave. En la Figura 34, se muestra de forma gráfica la evolución del fallo conforme aumenta el ancho del fallo. Por ejemplo, un fallo de ancho 0,3 mm corresponde a 26,1% de severidad. La Tabla 26, muestra la severidad para fallos de pista interna del rodamiento mientras que en la Tabla 27, los fallos propuestos en la pista interna.

Nivel	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Longitud (mm)	Severidad %
0	0	0	0	0,0
1	0,3	0,2	0,4	26,1
2	0,45	0,2	0,6	39,1
3	0,6	0,2	1,5	52,2
4	0,75	0,2	2	65,2
5	0,9	0,3	3	78,3
6	1	0,3	3	87,0
7	1 1 5	03	3	100.0

Tabla 26. Severidad para fallos de pista interna del rodamiento



Figura 34. Evolución del fallo en la pista interna

Tabla 27. Fallos propuestos para pista interna

Dimensiones (mm)	Severidad	Figura
Ancho: 0,15 Profundidad:0,2 Longitud:0,4	26,1%	
Ancho: 0,30 Profundidad:0,2 Longitud:0,60	39,1%	
Ancho: 0,45 Profundidad:0,2 Longitud:1,50	52,2%	
Ancho: 0,60 Profundidad:0,2 Longitud:2	65,2%	
Ancho: 0,75 Profundidad:0,3 Longitud:3	78,3%	

PISTA INTERNA RODAMIENTO NTN 1205SC3



PISTA INTERNA RODAMIENTO NTN 1205SC3

2.14.4. Severidad para fallos en pista externa

Para determinar la severidad del fallo en pista externa, se utiliza la regla de tres simple, donde se considera el nivel 7 como el fallo mas grave. En la Figura 35, se muestra de forma grafica la evolucion del fallo conforme aumenta el ancho del mismo. Por ejemplo, un fallo de ancho 0,75mm corresponde a 65,2% de severidad.

Nivel	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Longitud (mm)	Severidad %
0	0	0	0	0,0
1	0,3	0,2	0,4	26,1
2	0,45	0,2	0,6	39,1
3	0,6	0,2	1,5	52,2
4	0,75	0,2	2	65,2
5	0,9	0,3	3	78,3
6	1	0,3	3	87,0
7	1,15	0,3	3	100,0

Tabla 28. Severidad para fallo de pista externa del rodamiento



Figura 35. Evolución del fallo en la pista externa

Tabla 29. Fallos propuestos para pista externa

Dimensiones (mm)	Severidad	Figura
Ancho: 0,15 Profundidad:0,2 Longitud:0,4	26,1%	
Ancho: 0,30 Profundidad:0,2 Longitud:0,60	39,1%	
Ancho: 0,45 Profundidad:0,2 Longitud:1,50	52,2%	

PISTA EXTERNA RODAMIENTO NTN 1205SC3



PISTA EXTERNA RODAMIENTO NTN 1205SC3

2.14.5. Severidad para fallos en elemento rodante

Para determinar la severidad del fallo en elementos rodantes se utiliza la regla de tres simple en función del diámetro del fallo. En la Figura 36, se muestra de forma gráfica la evolución del fallo conforme aumenta diámetro del mismo. Por ejemplo, un fallo de diametro 0,3mm corresponde a 26% de severidad y un diámetro de 1,15mm corresponde a un 100% de severidad.

Nivel	Diámetro (mm)	Profundidad (mm)	Severidad %
0	0	0,28	0,0
1	0,3	0,28	26,1
2	0,45	0,28	39,1
3	0,6	1,27	52,2
4	0,75	1,27	65,2
5	0,9	1,27	78,3
6	1	1,27	87,0
7	1,15	1,27	100,0

Tabla 30. Severidad para fallo de elementos rodantes



Figura 36. Evolución del fallo en elementos rodantes

Dimensiones (mm)	Cantidad	Figura
N. de elementos:1 Diámetro: 0,30 Profundidad:0,28	26,1%	
N. de elementos:1 Diámetro: 0,45 Profundidad:0,28	39,1%	
N. de elementos:1 Diámetro: 0,60 Profundidad:1,27	52,2%	

Tabla 31. Fallos propuestos para elementos rodantes

Dimensiones (mm)	Cantidad	Figura
N. de elementos:1 Diámetro: 0,75 Profundidad:1,27	65,2%	
N. de elementos:1 Diámetro: 0,90 Profundidad:1,27	78,3%	
N. de elementos:1 Diámetro: 1 Profundidad:1,27	87%	
N. de elementos:1 Diámetro: 1,15 Profundidad:1,27	100%	

2.15. Simulacion del estado de cavitación

2.15.1. Revisión bibliográfica en inducción de cavitación

En la Tabla 32, se presenta un resumen de estudios realizados en cavitación por diferentes investigaciones enfocadas al MC de bombas centrifugas. Donde los principales puntos a tomar en cuenta son: nombre del fallo, causas y efectos del fallo, métodos de construcción para inducir artificialmente el fallo, así como sus niveles de severidad.

2.15.2. Analisis causa-raiz para cavitación

Si la presión del líquido (P) se reduce a la presión de vapor (Pv) del mismo, el líquido se evapora. Entonces el estado de cavitación ocurre cuando las burbuja regresa al estado líquido en áreas donde la presión es mayor a la presión de vapor (P > Pv), la burbuja tiene un ciclo de vida corto (milisegundos o incluso microsegundos). El estado de cavitación puede ocurrir en la entrada y descarga [88]–[90].

En la entrada como en la descarga diferentes motivos llevan al estado de cavitacion, en la Figura 37, se muestra varias causas que originan cavitación. Por ejemplo, cuando la presión en la entrada de la bomba es menor a la indicada por el fabricante, alta presión de vapor por aumento de la temperatura, velocidades en la entrada por encima de 1.5 m/s (agua) [50], [88], [91]–[93].

Si la bomba opera lejos de su punto de mejor trabajo o BEP, existe el riesgo de cavitación. De igual manera, velocidades por encima de los 15 m/s (agua), bloqueo en la tubería de descarga inducen cavitación [50], [88], [91]–[93].



Figura 37. Diagrama Ishikawa de varias causas que llevan a la cavitación en la entrada y salida de la bomba

Referencia	Nombre fallo	Causa/s	Efecto	Imagen	Método simulación	Severidad dimensiones
Vibration Based Multi-Fault Diagnosis for Centrifugal Pump [61]	Cavitación	La presión interior cae por debajo de la presión de vapor del fluido	Bajo rendimiento hidráulico. Ruido Erosión de material	Contraction of the second	Reducir el flujo en la succión con una válvula	Desarrollada
Artificial neural network based classification of faults in centrifugal water pump [57]	Cavitación	Inestabilidad hidráulica	Alta vibración Ruido Formación de burbujas		Reducir el flujo en la tubería de succión con una válvula	Desarrollada
The Non-intrusive Detection of Incipient Cavitation in Centrifugal Pumps [22]	Cavitación	Baja presión en la succión	Corrosión Picadura Erosión	Inter gas valve Vibration at exists and horever Section pressure Lett gas between the sector of the	Válvula de aire en la succión	2 severidades Incipiente Desarrollada
The application of Acoustic Emission for detecting incipient cavitation and the best efficiency point of a 60KW centrifugal pump; case study [48]	Cavitación	Baja presión en la succión	Picaduras en el impulsor Caída del rendimiento de la bomba		Reducir presión en la succión	Desarrollada
Detección de cavitación en una bomba centrífuga utilizando analisis de envolvente [94]	Cavitación		Bajo rendimiento		Interrumpir el flujo en la succión	Desarrollada

J6 +

Tabla 32. Estudios realizados para simular cavitación

Referencia	Nombre fallo	Causa/s	Efecto	Imagen	Método simulación	Severidad dimensiones
Monitoring of Cavitation in Centrifugal Pumps using Spectral Entropy of Vibro- acoustic measurements [95]	Cavitación	Inadecuada instalación. Variar las condiciones de operación Ambientes hostiles	Ruido Alta vibración Reduce el rendimiento Aumenta consumo de energía	Sydrophone sensor Voration at outlet of pump Pressure in suction Throttle 2." Pressure in suction Throttle 2." Ine at the pump inter e50mm :60mm	Válvula en la tubería de descarga	Incipiente Desarrolada
Research on Characteristic of the Vibration Spectral Entropy for Centrifugal Pump [96]	Cavitación	Flujo turbulento Baja presión en la succión	Alta vibración Ruido Energía adicional		Tanque equipado con bomba de vacío	Desarrollada
Determinación predictiva de la cavitación por parámetros sónicos [47]	Cavitación	Operar fuera de las condiciones de diseño	Disminuye rendimiento Erosión		Válvula en la tubería de succión	Desarrollada

2.15.3. Propuesta para simular el estado de cavitación

Para inducir el estado de cavitación en la entrada de la bomba, es necesario establecer las condiciones iniciales de operación trabajando en el punto de máxima eficiencia (n=58%) correspondiente a un caudal de Q=15 gpm (60 l/min) a una cabeza de H=87 m (287 feet) como se muestra en la Figura 38.



Figura 38. Curva altura-caudal (a), curva-rendimiento caudal (b)

Para disminuir la carga neta de succión positiva disponible (NPSHd) es necesario estrangular la válvula en la succión (Ver Figura 39) hasta lograr la caída del 3% en la cabeza o altura entregada por la bomba.



Figura 39. Sistema de bombeo planta A – 1

En la Figura 40, se muestra la gráfica H vs NPSHd donde se observa la caída del 3% correspondiente a un NPSHd de 0,54 m a una cabeza entre 85 a 87 mca, en este punto se obtiene el estado de cavitación desarrollada.



Figura 40. Curva H-NPSHd

Para simular la cavitación en una bomba centrífuga se trabaja a la velocidad normal de la bomba 3500 rpm que equivale a una frecuencia de 60 Hz aproximadamente, la cual permanecerá constante.

Para perturbar el sistema generando cavitación basta con cerrar de forma gradual la válvula en la succión, esto provocará un aumento en las pérdidas a la entrada de la bomba por ende una sustancial caída de la altura neta de entrada positiva disponible (NPSHd) la cual será menor a la altura neta de entrada requerida por el fabricante (NPSHr) en consecuencia la bomba entrará en el fenómeno de cavitación ya que la presión de entrada hacia la bomba será menor que la presión de vapor del líquido. De modo que:

NPHSdisponible < NPHSrequerida = CAVITACIÓN

2.16. Instrumentación y condiciones de operación

Con el objetivo de garantizar una correcta base de datos, las condiciones de operación de la bomba deben estar definidas y estandarizadas. Asegurar que los parámetros de trabajo y las variables físicas sean las mismas para todas las experimentaciones realizadas es fundamental para determinar dicho fin. En la Tabla 34 se muestra un resumen bibliográfico de trabajos realizados en máquinas rotativas como bombas centrífugas y caja de engranes. Esta información resulta útil ya que permite conocer la ubicación de acelerómetros, micrófonos y otros instrumentos, así como las condiciones para simular diferentes fallos. Apoyados en esta información se decide la ubicación de los instrumentos y las condiciones de operación.

La Tabla 33, presenta los datos técnicos de operación de la bomba centrífuga multietapa Goulds e-SV para este proyecto.

Parámetro	Valor		
Velocidad nominal constante	3500 rpm		
Temperatura	Ambiente \pm 1°C		
Caudal nominal (máxima eficiencia)	15 GPM (3.4 m ³ /h)		
Altura nominal (máxima eficiencia)	90 m.c.a		

Tabla 33. Datos técnicos bomba GOULSD e-SV

Referencia	Tipo maquina	Imagen Sistema	Condiciones	Instrumento/dirección	Ubicación
Intelligent Diagnosis Method for Centrifugal Pump System Using Vibration Signal and Support Vector Machine [56]	Bomba centrifuga Potencia: 3.7 kW Altura: 40m Descarga:7.5m³/h		Velocidad constante 3500 rpm Frecuencia muestreo: 50 kHz	Acelerómetro 1 Acelerómetro 2/vertical Acelerómetro 3/axial Acelerómetro 4/vertical Acelerómetro 5/axial	Voluta bomba Succión Succión Descarga Descarga
Vibration- Based Multi- Fault Diagnosis for Centrifugal Pumps [61]	Bomba centrifuga	For market For market	Velocidad constante: 2100 rpm Frecuencia muestreo: 48 kHz	Acelerómetro 1/vertical Acelerómetro 2/vertical Acelerómetro 3/vertical Acelerómetro 4 /vertical	Succión Voluta Descarga Rodamiento
Diagnosis of Centrifugal Pump Faults Using Vibration Methods [65]	Bomba centrifuga Potencia: 5.5 Hp Altura: 55m Descarga: 5001/min		Velocidad constante 2900 rpm Caudal variable en la descarga de 220 l/min – 320 l/min hasta 500l/min	Encoder Sensor flujo Sensor presión Sensor presión Acelerómetros	Eje motor Línea descarga Succión Descarga Voluta
The Non- intrusive Detection of Incipient	Bomba centrifuga Potencia: 5.5hp Altura: 55m Descarga: 500L/min		Temperatura: 20°C ± 1°C Velocidad constante: 2900 rpm Frecuencia de muestreo: 96kHz por 10 segundos	Caudalimetro Transductor presión Transductor presión Acelerómetro 1/vertical Acelerómetro 2/axial	Descarga Succión Descarga Voluta-motor Descarga

Tabla 34. Revisión bibliográfica de las condiciones de operación e instrumentación de sistemas de bombeo con varacion de caudal en la descarga

Referencia	Tipo maquina	Imagen Sistema	Condiciones	Instrumento/dirección	Ubicación
Cavitation in Centrifugal Pumps [22]			Caudal variabale con 14 conjuntos de datos en la descarga	Encoder Hidrófono Micrófono acústico Variador de frecuencia	Eje motor Descarga Descarga Motor
Detección de cavitación en una bomba centrífuga usando emisiones acústicas [42]	Bomba centrifuga Potencia ½ hp		Frecuencia de muestreo 2.5MHz Cavitación (tres niveles: 100%-86%-60%)	Sensor emisión acústica	Voluta
Numerical and experimental investigation of cavitation flows in a multistage centrifugal pump	Bomba Multietapa Potencia 11Kw		Velocidad constante: 3600 rpm. Variacion del caudal de punto de diseño PD (60 ~ 130% Qd.p.)	Acelerometro 2/axial Encoder	Succión Descarga.

[97]

Al observar los datos bibliográficos descritos por otros autores, encontrar el BEP *(best efficiency point)* es de vital importancia para que la bomba funcione con su máximo rendimiento obteniendo los datos de caudal y altura necesarios para la operación. Para conseguirlo, debe existir una relación entre las curvas características de la bomba, se puede variar la curva de la bomba cambiando la velocidad de giro del motor o a su vez variar la curva del sistema mediante la estrangulación de una la válvula en la descarga.

Para simular las diferentes condiciones de operación en la bomba centrífuga multietapa GOULDS e-SV 3SV10GE4F20 se considera los datos teóricos de caudal Q = 15GPM y presión P = 90 mca como valores nominales. Para obtener el punto de trabajo se tiene que relacionar las curvas características tanto de la bomba como del sistema ya sea variando la velocidad en el motor o estrangulando la válvula en la descarga respectivamente.

Para generar cavitación se recurre a la norma ISO 3555, donde se relaciona la NPSHd y la NPSHr para obtener el valor ideal donde empezará la cavitación, es decir, donde el NPSHr es más alto que el NPSHd. Las señales para el monitoreo de la condición se tomarán al 100%, 83%, 60% del caudal nominal de la bomba, para cada uno se indujeron dos niveles de severidad distintos en la cavitación uno correspondiente a cavitación incipiente y el otro a cavitación completamente desarrollada.

Para provocar cavitación incipiente es necesario la caída del 3% de la cabeza de la bomba con respecto a la cabeza en condiciones normales, esto provocará que a cierto caudal y altura la bomba empiece a cavitar.

Para provocar la cavitación completamente desarrollada se deberá estrangular la válvula en la succión de tal manera que supere la caída del 3% y la NPSr sea mayor a la NPSd, de esta manera se garantiza una cavitación completamente desarrollada además que se presente un cambio sonoro en el sistema debido al colapso de las burbujas.

Variar la velocidad del motor pude ser considerada una alternativa para provocar cavitación, para lograrlo se necesita mantener una estrangulación constante en la válvula de la succión y variar la velocidad del motor mediante un variador de frecuencia al 100%, 80% 60% de la velocidad máxima (3500 rpm) garantizando que exista un cambio en la curva de la bomba y de esta manera encontrar mediante ensayo de prueba y error los parámetros para obtener cavitación incipiente y completamente desarrollada.

3. CAPÍTULO 3 - EXPERIMENTACIÓN

3.1. Estación de bombeo

La estación de bombeo se diseñó para adquirir señales de vibración y acústicas en una bomba centrífuga multietapa durante la evolución de fallos inducidos artificialmente. Los requerimientos determinados para la estación son: 1) Proceso a escala con instrumentación industrial para el control y manipulación de variables (caudal, presión, velocidad); 2) Monitoreo y adquisición de variables manipuladas y perturbaciones; 3) Componentes mecánicos internos de la bomba con diferentes fallos y diferentes severidades; 4) Normas y buenas prácticas de ingeniería para montaje de estaciones de bombeo; 5) Posibilidad de variar caudal y altura de la bomba; 6) Disponer suficiente espacio para un adecuado mantenimiento y cambio de fallos.



Figura 41. Diagrama de instrumentación y proceso (P&ID), según la norma ISA-S5.4

En la Figura 41, se muestra el proceso que está conformado por un tanque A, provisto con un indicador de nivel (LI 100A), que suministra agua a la bomba P1. Para medir presión en la entrada de la bomba se tiene un transmisor de presión (PT 100A) y un vacuómetro (PI 100A) dispuestos en una bifurcación en "T". Las válvulas en la descarga (FC 100B, FC 100) permiten variar caudal, el manómetro (PI 100B) y transmisor (PT 100B) miden presión en la descarga. El transmisor de flujo (FT 100A) permite conocer a todo momento el flujo volumétrico entregado por la bomba. Finalmente, el tanque B posee un indicador de nivel (LI 100B) y recibe el fluido de descarga que desfoga a través de la válvula (FC 100C). La Figura 42, muestra la disposición física y la instrumentación del sistema de bombeo.



Figura 42. Disposición de la estación de bombeo

3.2. Proceso experimental

El objetivo de establecer un proceso experimental es garantizar la reproducibilidad en la adquisición de señales acústicas y de vibración. La Figura 43 presenta el proceso.



Figura 43. Proceso experimental para señales acústicas y de vibración

3.2.1. Puesta a punto de la estación de bombeo

• Realizar una inspección visual de la bomba, verificando el montaje de todos los elementos mecánicos y posicionamiento de válvulas.

- Verificar visualmente que no exista presencia de fugas en las bridas y acoples tanto en la succión como en la descarga.
- Verificar que las plantas A y B estén en óptimo funcionamiento y no estén ejecutanto otra operación.

3.2.2. Conexión y ubicación de sensores

Micrófonos

Las señales acústicas se propagan a través del aire, desde los elementos mecánicos hasta el micrófono capacitivo, por lo tanto, las ondas acústicas deben transmitirse con nulas o pocas variaciones durante las pruebas. El micrófono capacitivo PCB HT378B02 capta de forma unidireccional las señales acústicas, es decir recoge señales provenientes de una sola dirección (ángulo de incidencia de 0 grados sobre el diafragma).

En la Figura 44 se muestra la conexión del micrófono PCB HT378B02, el micrófono se conecta al módulo NI-9234 mediante un cable coaxial RG58- BNC-BNC. Luego, el módulo encaja en el chasis cDAQ-9188. Finalmente, el computador recibe las señales del chasis a través de un cable eternet.



Figura 44. Secuencia de la conexión real del sistema de adquisión de sañales acústicas

Acelerómetros

Las señales de vibración no son más que ondas mecánicas propagadas a través de un medio material. Estas señales son captadas por un acelerómetro capacitivo PCB 603C01, al aplicar una fuerza de aceleración sobre el sensor, las placas capacitivas en el interior se mueven una a otra, esto ocasiona que la capacitancia entre ellas cambie. A partir de estos cambios en la capacitancia es con lo que se puede determinar la aceleración.

En la Figura 45 se muestra la conexión del acelerómetro capacitivo PCB 603C01, el acelerómetro se conecta al módulo NI-9234 mediante un cable MIL-C5015. Luego, el módulo encaja en el chasis cDAQ-9188. Finalmente, el computador recibe las señales del chasis atraves de un cable ethernet. Las señales se muestran en la interfaz grafica del software LabVIEW.



Figura 45. Secuencia de la conexión real del sistema de adquisión de sañales de vibración

Ubicación de los sensores

La norma ISO 20816 Vibración mecánica-medida y evaluación de la vibración mecánica (parte 1) propone que las medidas deben ser tomadas en elementos estructurales los cuales respondan significativamente a las fuerzas dinámicas transmitidas por los elementos rodantes. El requerimiento para el monitoreo operacional se cumple al realizar una o dos mediciones normalmente en las direcciones horizontal transversa y/o vertical.

En este trabajo los sensores están ubicados de tal forma que recogan señales de vibración y acústicas de los elementos mecánicos críticos como sello mecánico, impulsores y rodamientos. En la Figura 46 se muestra la ubicación de los acelerómetros uno a cuatro.

En la Figura 47 se presenta la ubicación de los micrófonos. El micrófono uno esta ubicado en la dirección Y (radial-transversal) y el micrófono esta ubicado en la dirección Z (axial).



Figura 46. Ubicación sensores de vibración



Figura 47. Ubicación de micrófonos

3.3. Acondicionamiento del programa de adquición de datos (LabVIEW)

El grupo de investigación y desarrollo de tegnologias industriales (GIDTEC) ha desarrollado un programa para la adquicion de señales acústicas y vibración. El programa fue desarrollado a través del software LabVIEW. En la Figura 48, se visualiza la interfeaz.



Figura 48. Interfaz gráfica del programa para la adquisición de señales acústicas y de vibración

3.4. Condiciones de operación

El proposito de las condiciones de operación es garantizar la repetibildad y reproducibilidad de las señales de vibración y acústicas. En este trabajo se toma señales en el punto de mejor trabajo de la curva motriz de la bomba. Se conoce por el cátalogo del fabricante el punto de mejor trabajo de la bomba corresponde a 300ft@15gpm y una eficiencia de 60%. Por lo tanto, se considera como línea base al punto de mejor trabajo de la bomba. En la Figura 49, se muestra el resultado obtenido para la curva motriz de la bomba y su curva de eficiencia. Cabe resaltar las curvas fueron obtenidas según la norma ANSI/HI 1.6. El punto de mejor trabajo (línea base) para este trabajo es 281ft@15gpm y una eficiencia de 56%

Por lo tanto, cuando los diferentes instrumentos marquen los parámetros mencionados anteriormente. El sistema está ajustado para las condiciones de mejor operación.



Figura 49. Curva motriz y curva de rendimiento

3.5. Línea base

La línea base es la primera adquision de señales de vibración y acústicas en el punto de mejor trabajo posteriormente la línea base sirve de comparación con las señales tomandas cuando ya se han introducido fallos en la bomba centrifuga.

3.6. Espectros de las señales de vibración

Frecuencia de Paso de Alabes conocido como BPF por sus siglas en inglés *Blade Past Frecuency* es igual al número de paso de álabes (o áspas) por las revoluciones por minuto RPM ver Figura 50. Esta frecuencia es inherente en bombas, ventiladores y compresores y por lo general no presenta problemas. Sin embargo, un BPF de amplitud grande (y armónicas) puede generarse en una bomba en caso de que el espacio entre los álabes y los difusores estacionarios no sea igual en toda la periferia. Además, el BPF (o armónicas) puede coincidir algunas veces con una frecuencia natural del sistema causando alta vibración. El BPF alto puede generarse en caso de que el anillo de desgaste del impulsor se atore en el eje, o en caso de que fallen las soldaduras de los difusores. Así mismo, el BPF alto puede deberse a doblamientos abruptos en la tubería (o en el ducto), a obstrucciones que interrumpen el flujo, a los ajustes del amortiguador o si la bomba o el rotor del abanico se posicionan de forma excéntrica dentro de la caja. El BPF es útil para diagnosticar la evolución de los fallos.



Figura 50. Frecuencia de paso de álabes y armónicos

3.6.1. Espectro de la señal de cavitación

En la figura 51, se presenta la señal de vibración en condición normal frente a la condición de cavitación. Se aprecia como la cavitación genera picos de amplitud alta respecto a la condición normal o línea base en un rango de 400 a 800 Hz. En la escala ampliada de la Figura 52 se observan armónicos de amplitud alta y banda ancha haciendo evidente la presencia de cavitación. Por lo tanto, las señales de vibración resultan apropiadas para detectar cavitación.





(acelerómetro 3)



Figura 52. Espectro de vibración 350-800Hz, condición normal versus cavitación

(acelerómetro 3)
3.6.2. Picadura mixta espectro de vibración

En la Figura 53, se presenta la señal de vibración en condición normal frente a la señal de picadura mixta. Se obseva, picos de amplitud alta respecto a la condición normal o línea base, especialmente en la frecuencia de 600 Hz. En la escala ampliada de la Figura 54, aperece un ligero crecimiento del BPF (350 Hz) en su amplitud con respecto a la condición normal. Por lo tanto, las señales de vibración son adecuadas para estudiar picaduras mixtas en los impulsores.



Figura 53. Espectro de vibración 0-1000Hz, condición normal versus mixto

(acelerómetro 3 - quinta etapa)



Figura 54. Espectro de vibración 350-800Hz, condición normal versus mixto

(acelerómetro 3 - quinta etapa)

3.6.3. Desbalanceo espectro de vibración

En la Figura 55, se presenta la señal en condición normal frente a la señal de desbalanceo. Como es característico, el desbalanceo tiende al aumento en la frecuencia de giro del motor (60 Hz). En la escala ampliada de la Figura 56, el BPF (350Hz) desarrolla armónicos (1RPM) de amplitud alta. Por lo tanto, las señales de vibración resultan apropiadas para detectar desbalanceo.



Figura 55. Espectro de vibración 0-1000Hz, condición normal versus desbalanceo

(acelerómetro 2 - décima etapa)



Figura 56. Espectro de vibración 350-800Hz, condición normal versus desbalanceo

(acelerómetro 2 - décima etapa)

3.6.4. Picadura externa espectro de vibración

En la Figura 57, se presenta la señal en condición normal frente a la señal de picadura externa. La picadura interna en los álabes a generando frecuencias de picos altos alrededor del BPF (350Hz) en un rango de 400 a 800 Hz. Sin embargo, en la escala ampliada de la Figura 58, el pico correspondiente al BPF (350Hz) disminuyo drásticamente. Por lo tanto, las señales de vibración pudieran no ser adecuadas para estudiar fallo por picadura externa si se toma como guía el BPF.



Figura 57. Espectro de vibración 0-1000Hz, condición normal versus picadura externa

(acelerómetro 3 - décima etapa)



Figura 58. Espectro de vibración 350-800Hz, condición normal versus picadura externa

(acelerómetro 3 - décima etapa)

3.6.5. Bloqueo espectro de vibración

En la Figura 59, se presenta la señal en condición normal frente a la señal de bloqueo. Se observa como la frecuencia de giro del motor aumento su amplitud, además, aparecen picos de frecuencia alta en todo el espectro. En la escala ampliada de la Figura 60, el BPF (350 Hz) aumenta en amplitud y desarrolla armónicos (1RPM o 60Hz). Por lo tanto, las señales de vibración resultan útiles para estudiar el fallo por bloqueo.



Figura 59. Espectro de vibración 0-1000Hz, condición normal versus bloqueo

(acelerómetro 3 - quinta etapa)



Figura 60. Espectro de vibración 350-800Hz, condición normal versus bloqueo

(acelerómetro 3 - quinta etapa)

3.6.6. Multifallo espectro de vibración

En la Figura 61 se presenta la señal de condición normal frente a la condición multi fallo donde se introdujo bloqueo en la etapa dos, desbalanceo en la etapa cuatro, picadura mixta en la etapa seis y picadura externa en la etapa ocho. A lo largo del espectro surgen amplitudes de pico alto. En la escala ampliada de la Figura 62 el BPF (350 Hz) aumentó en amplitud y desarrollo armónicos a 1X de picos altos. Por lo tanto, las señales de vibración resultan útiles para estudias fallos multiples.



Figura 61. Espectro de vibración 0-1000Hz, condición normal versus multifallo

(acelerómetro 4 - etapas 2, 4, 6 y 8)



Figura 62. Espectro de vibración 350-800Hz, condición normal versus multifallo

(acelerómetro 4 - etapas -2, 4, 6 y 8)

3.7. Señales acústicas

3.7.1. Cavitación espectro acústico

En la Figura 63, se presenta la señal acústica en condición normal frente a la señal de cavitación, es notorio como la señal de cavitación desarrolla gran cantidad de ruido además de armoicos altos alrededor del BPF (350 Hz). En la escala ampliada de la Figura 64, la amplitud del BPF se pierde, pero no sus armónicos a 1X (60Hz).



Figura 63. Espectro acústico 0-1000Hz, condición normal versus cavitación

(Micrófono 2)



Figura 64. Espectro acústico 270-430Hz, condición normal versus cavitación

(Micrófono 2)

3.7.2. Picadura mixta espectro acústico

En la Figura 65, se presenta la señal acústica en condición normal frente a la señal de picadura mixta, aquí surgen varios picos de amplitud alta en todo el espectro. En la escala ampliada de la Figura 66, el BPF (350 Hz) se mantiene, sin embargo, su armonico (1x rpm = 410Hz) crece.



Figura 65. Espectro acústico 0-1000Hz, condición normal versus mixto

(Micrófono 2)



Figura 66. Espectro acústico 270-430Hz, condición normal versus mixto

(Micrófono 2)

3.7.3. Desbalanceo espectro acústico

En la Figura 67, se presenta la señal acústica en condición normal frente a la señal de desbalanceo, aquí se observa la aparición de una frecuencia de banada ancha a 200Hz. En la escala ampliada de la Figura 68, la amplitud del BPF (350Hz) disminuye asi como sus armónicos.



Figura 67. Señal acústica 0-1000Hz, condición normal versus desbalanceo

(Micrófono 2)



Figura 68. Señal acústica 270-430Hz, condición normal versus desbalanceo

(Micrófono 2)

3.7.4. Picadura externa espectro acústico

En la Figura 69, se presenta la señal acústica en condición normal frente a la señal de picadura externa, surgen frecuencias de picos altos en todo el espectro. En la escala ampliada de la Figura 70, el BPF (350Hz) desarrolla un armónico a 1x rpm (410 Hz).



Figura 69. Señal acústica 0-1000Hz, condición normal versus picadura externa

(Micrófono 2)



Figura 70. Señal acústica 270-430Hz, condición normal versus picadura externa

(Micrófono 2)

3.7.5. Bloqueo espectro acústico

En la Figura 71, se presenta la señal acústica en condición normal frente a la señal de bloqueo, el fallo por bloqueo aumenta la amplitud de la frecuencia de giro del motor. En la escala ampliada de la Figura 72, el BPF (350 Hz) armónicos a 410 y 290Hz.



Figura 71. Señal de acústica 0-1000Hz, condición normal versus bloqueo

(Micrófono 2)



Figura 72. Señal de acústica 270-430 Hz, condición normal versus bloqueo

(Micrófono 2)

3.7.6. Multifallo espectro acústico

En la Figura 73 se muestra la señal en condición normal frente a la condición multi fallo donde se introdujo bloqueo en la etapa dos, desbalanceo en la etapa cuatro, picadura mixta en la etapa seis y picadura externa en la etapa ocho. En la Figura 74 se observa la aparición de un armónico a 290 Hz, pero la disminuye la amplitud del BPF (350Hz).



Figura 73. Señal de acústica 0-1000Hz, condición normal versus multifallo

(Micrófono 2)



Figura 74. Señal de acústica 270-430Hz, condición normal versus multifallo

(Micrófono 2)

3.8. Comparación entre las señales de vibración y acústicas

En las Figuras 75 y Figura 76 se presentan las señales de vibración y acústicas respectivamente de todos los fallos simulados. Como era de esperar, las señales acústicas en su espectro en el dominio de la frecuencia presentan más ruido en comparación a las de vibración debido a la presencia de señales no deseadas provenientes del medio. Además en cada técnica se puede visualizar según el fallo inducido, la variación del espectro con respecto a su línea base.



Figura 75. Señales de vibración de todos los fallos simulados



Figura 76. Señales acústicas de todos los fallos simulados

4. CAPÍTULO 4 - GUÍA DE PRÁCTICA

Para la elaboración de una guía de práctica se requiere cumplir con el formato establecido de la Universidad Politecnica Salesiana. La guía deberá aportrar de manera significativa al estudiante, es decir, aportar conocimientos sobre el manejo y detección de fallos mediante la técnica de análisis de vibración [10]. En la Figura 77, se muestra el proceso para elaborar un a guía de practica.



Figura 77. Diagrama de flujo para validar la guía de práctica

4.1. Consulta bibliográfica

Para elaborar la guía de práctica, es necesaria la revisión bibliográfica de libros, artículos científicos, normas internacionales y tesis que abordan el tema. En la Tabla 35 se presenta un resumen de los trabajos que contienen información para la guía de práctica. En este compendio destaca la documentación de análisis de vibraciones, ya que a nivel académico o industrial es el más utilizado para la prevención del mantenimiento de máquinas o denomidado mantenimiento basado en la condición.

Bibliografia	Analisis de vibraciones	Detección de fallos en bombas	
		centrifugas	
Libros	[91]		
Artículos científicos	[86] [95] [96]	[98] [84]	
Tesis	[88] [99]	[61]	

Tabla 35	5. Revisión	bibliográfica	para la	guía de	práctica
				0	

4.2. Requerimientos para la guía de práctica

En base a a la bibliografía revisada es necesario cumplir con los suientes puntos:

- Tema
- Presentación de la práctica
- Requisitos y precausiones
- Objetivos
- Equipos, intrusmentos y software
- Normas de seguridad
- Exposición
- Proceso y procedimiento
- Conclusions y recomendaciones
- Referencias

4.3. Elaboración de la guía de práctica

La guía práctica se presenta con el título "Detección de cavitación en una bomba centrífuga multietapa vertical mediante análisis de vibraciones", cuyo objetivo es socializar al estudiante conceptos básicos sobre el mantenimiento basado en la condición, enfocando la vibración mecánica producida en máquinas hidráulicas particularmente en una bomba centrífuga

multietapa bajo el estado de cavitación. La guía de práctica se encuantra disponible en el Anexo 1.

4.4. Revisión de la guía de práctica

Se realizaron revisiones y prácticas piloto para estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica. El propósito de las revisiones es adquirir retroalimentación de los resultados obtenidos.

4.5. Ejecución de la guía de práctica

La guía de práctica fue ejecutada por estudiantes y egresados de la carrera de ingeniería mecánica. Los cuales dieron recomendaciones para mejorara la guía de práctica. Las observaciones fueron las siguientes.

- Correguir errores de redacción y estilo de texto
- Mejorar calidad de imágenes
- Extender marco teorico

4.6. Calificación de la guía de práctica

El proceso de calificación de la guía de práctica se estableció mediante el formato propuesto por Nivelo y Romero en el apartado "Ficha de valoración de guías de práctica" [100], en el cual se evalúan cuatro aspectos principales que se enlistan a continuación:

- ✓ Logros de aprendizaje
- ✓ Estructura básica
- ✓ Estrategia metodológica
- ✓ Materiales educativos

La ficha de evaluación para la guía de práctica es calificada por cada persona que realiza la práctica con una valoración de 21 puntos, requieriendo un porcentaje mínimo de 85% de la nota máxima para dar por aprobada de la guía de práctica. El listado de estudiantes participantes de la práctica se presenta en el Anexo 2.

4.7. Validación de guía de práctica

Para el proceso de validación de la guía de práctica se contó con la presencia de 6 estudiantes de noveno nivel y 4 egresados de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politecnica Salesiana.

El resultado de la evaluación fue una calificación promedio de 18,5/21 equivalente al 88,09 %. De esta manera bajo el criterio establecido en, la guía de práctica queda validada y disponible para la realización en los laboratorios de vibraciones mecánicas de la universidad. Los resultados de la evaluación se detallan en la Figura 78.



Figura 78. Resultados para validación de la guía de práctica

CONCLUSIONES

Se ha realizado la adquisición de señales acústicas y vibracionales para el diagnóstico de fallos en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical para esto se identificó los elementos mecánicos críticos en una bomba multietapa son los impulsores, sello mecánico, eje de la bomba y rodamientos sin dejar de lado una de las condiciones menos deseadas de un sistema de bombeo que es la cavitación.

Para el proceso de adquisición de señales acústicas y vibracionales se implementó un banco de pruebas para bombas multietapa en el laboratorio de vibraciones en el que se llevó a cabo la simulación de fallos de elementos mecánicos críticos.

En cuanto análisis de espectro de vibración y señales acústicas, existe diferencia en la lectura en cuanto a niveles de aceleración y rangos de frecuencia producto de las condiciones propias que presenta cada fallo.

Finalmente se validó la guía de práctica establecida en este proyecto técnico, la misma que se centra en la detección de fallo por cavitación mediante el análisis de vibración.

RECOMENDACIONES

Se recomienda establecer lineamientos para el montaje de los elementos mecánicos de la bomba, como torque de apriete de tornillos con el fin de determinar si la variación de estos factores alteran de alguna manera las señales acústicas y de vibración.

Optimizar el tiempo de montaje y desmontaje de elementos con fallo, especialmente de los impulsores en la decima etapa, ya que para su cambio se requiere desmontar casi todo el conjunto interior. Esto con el propósito de reducir el tiempo de adquisición de bases de datos más extensas.

Realizar mantenimiento constante de los depósitos de agua y filtros en el sistema asi como el control del pH en el agua ya que estos valores en exceso pueden generar problemas futuros en las condiciones del sistema de bombeo.

TRABAJOS FUTUROS

En cuanto a la realización de trabajos futuros, analizar los espectros de vibración y señales acústicas es un fin inmediato, además de realizar la construcción de fallo en sello mecánico y rodamientos ya que de esta manera se podrá estudiar a mayor detalle cual es el comportamiento de la bomba al enfrentar una perturbación y como afecta su actividad normal de funcionamiento.

REFERENCIAS

- C. Vintimilla y M. René, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas de una caja reductora combinando fallos de rodamientos y engranajes rectos para fines investigativos en la Universidad Politécnica Salesiana», feb. 2014.
- [2] N. Jara, S. Vinicio, R. Rodríguez, y D. Julián, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos rotativos con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en rodamientos», nov. 2014.
- [3] G. Guiracocha y R. Andrés, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones acústicas e imágenes termográficas infrarrojas para un sistema mecánico rotativo con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en engranajes», ene. 2015.
- [4] M. Zumba, C. Enrique, V. Rodas, y Á. Genaro, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas y acústicas de un sistema mecánico rotativo con la combinación de fallos de rodamientos y engranajes helicoidales, y elaboración de guía de práctica para desbalanceo estático», mar. 2015.
- [5] O. Farfán, C. German, P. Rivera, y I. Andrés, «Adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas», oct. 2016.
- [6] P. Edison, «Adquisición de señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa», may 2018.
- [7] D. Chingal, «Adquisición de señales de corriente del motor de inducción combinando fallos en la maquinaria rotativa y elaboración de una guía de práctica sobre detección de fallos por medio del AFCM», jun. 2018.
- [8] Francisco José Lojano Armijos, «Señales acústicas y de vibración: estudio comparativo para la detección de severidad de fallos en engranes rectos», escrito. 2018.
- [9] Holger Florencio Llivicura Orellana, «Señales de vibración; Evaluación de indicadores de condición extraídos del dominio de frecuencia para el diagnóstico de fallos en cajas de engranajes rectos.», Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador. Oct. 2019.
- [10] F. D. Cajas Muñoz y C. P. Torres Díaz, «Adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor reciprocante de doble etapa», dic. 2018.
- [11] S. M. J. Ali, «Measurement of vibration and noise level at power plant and refinery companies that represents a condition monitory for the health of machines», en 2017
- [12] World Pumps, «How to improve the flow in a centrifugal pump» ene. 2018.
- [13] C. Imaicela y D. Esteban, «Adquisición de señales de corriente del motor de inducción combinando fallos en la maquinaria rotativa y elaboración de una guía de práctica sobre detección de fallos por medio del AFCM», jun. 2018.
- [14] V. Sánchez, «Diagnóstico de fallos en cajas de engranajes mediante la aplicación de diferentes técnicas de inteligencia artificial», UNED, 2017.
- [15] M. Tahan, T. Elias, M. Masdi, y A. K. Z.A., "Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: A review" 2017.
- [16] Glen White, «Introducción al Analisis de Vibraciones». Azima DLI. USA 1990.
- [17] M. Tsypkin, «Induction motor condition monitoring: Vibration analysis technique A practical implementation», en 2011 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC), 2011, pp. 406-411.

- [18] W. Sánchez, C. Carvajal, J. Poalacin, y E. Salazar, "Detection of cavitation in centrifugal pump for vibration analysis", en 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), 2018, pp. 460-464.
- [19] M. R. Nasiri, M. J. Mahjoob, y H. Vahid-Alizadeh, «Vibration signature analysis for detecting cavitation in centrifugal pumps using neural networks», en 2011 IEEE International Conference on Mechatronics, 2011, pp. 632-635.
- [20] I. D. A. Pernia-Márquez, «Introducción a la medición de vibración», p. 15. 2017.
- [21] G. Perez, «Mantenimiento mecánico de máquinas, 2a. ed. Universitat Jaume I. Servei de Comunicación: i Publicacions, 2007.
- [22] F. Al Thobiani, "The Non-intrusive Detection of Incipient Cavitation in Centrifugal Pumps", doctoral, University of Huddersfield, 2011.
- [23] D. M. G. Giraldo y E. S. Henao, «Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones en un equipo rotativo de buen café liofilizado de Colombia (estudio de caso)», p. 140. 2018.
- [24] A. Mayorga y L. Amable, «Análisis espectral de señales de vibraciones mecánicas causadas por desalineación como método de mantenimiento predictivo en bombas hidráulicas centrifugas horizontales de flujo radial de 1 HP», abr. 2015.
- [25] M. Ghiselli, «Medición y análisis de vibraciones: una herramienta para la predicción y evaluación de fallas en maquinarias», p. 5.
- [26] N.R.Sakthivel, V.Sugumaran «Vibration based fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using decision tree». ScienceDirect. Jun 2010.
- [27] A. M. J. Jaramillo, «Acústica: la ciencia del sonido». ITM, 2007.
- [28] J. Cabrera «Acústica y fundamentos del sonido», UNAD p. 145. Bogotá 2010.
- [29] D. Maggiolo «Propagación del sonido». Jun 2015.
- [30] H. Cao, Y. Yue, X. Chen, y X. Zhang, "Chatter detection in milling process based on synchrosqueezing transform of sound signals", Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 89, n." 9, pp. 2747-2755, abr. 2017.
- [31] S. Schindler, T. Hergemöller, T. Koch, y O. Tödter, «Analysis of a lab-based measure concept for the acoustics of high pressure fuel pumps», en 17. Internationales Stuttgarter Symposium, 2017, pp. 259–277.
- [32] S. A. Al-Hashmi, «Statistical Analysis of Acoustic Signal for Cavitation Detection», vol. 3, n.º 4, p. 6, 2013.
- [33] S. Al-Hashmi, F. Gu, Y. Li, A. D. Ball, T. Fen, y K. Lui, «Cavitation Detection of a Centrifugal Pump Using Instantanous Angular Speed», en Volume 3, Manchester, England, 2004, pp. 185-190.
- [34] J. Černetič y M. Čudina, «Estimating uncertainty of measurements for cavitation detection in a centrifugal pump», Measurement, vol. 44, n.º 7, pp. 1293–1299, ago. 2011.
- [35] J. Pérez Castillo, Generación de ruido tonal en bombas centrífugas por interacción fluidodinámica entre rodete y voluta. 2009.
- [36] Julio César Sánchez, «Bombas centrifugas 2 ed-fluidos- e.carnicer c.mainar», 03:15:35 UTC. abr. 2016.
- [37] J. Agüera, Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas. Madrid: Ciencia, 1992.
- [38] Claudio Mataix «Turbomaquinas Hidraulicas 3ra Edicion». Editorial del Castillo. Madrid, 1986.
- [39] E. Carnicer Royo y C. Mainar «Bombas centrífugas». Tompson Paraninfo. Madrid 1995.
- [40] B P. Kamiel 2015. «Vibration based multi fault diagnosis for centrifugal pumps» 2015.
- [41] C. Barta, «¿Qué es un sello mecánico y de qué material está hecho?», CarboSystem, Mar 2018.

- [42] J. Quiroga M., S. Oviedo C, y A. García C, «Detección de cavitación en una bomba centrífuga usando emisiones acústicas», Ingeniare Rev. Chil. Ing., vol. 20, n.º 3, pp. 343-349, Dic. 2012.
- [43] S. de las Heras «Fluidos Bombas e Instalaciones Hidráulicas». Universitat Politécnica de Catalunya - Reader. Ene 2011.
- [44] R. S. R. Gorla y A. A. Khan, Turbomachinery: Design and Theory. CRC Press, 2003.
- [45] D. V. Shah, J. M. McLeod, y S.-H. Yoon, «Communication, Context, and Community: An Exploration of Print, Broadcast, and Internet Influences», Commun. Res., vol. 28, n.º 4, pp. 464-506, ago. 2001.
- [46] S. A. Al-Hashmi, «Statistical Analysis of Acoustic Signal for Cavitation Detection», vol. 3, n.º 4, p. 6, 2013.
- [47] A. Cáceres, A. Andree «Determinación predictiva de la cavitación por Parámetros Sónicos».UNSA, Arequipa. 2016.
- [48] L. Alfayez, D. Mba, y G. Dyson, "The application of acoustic emission for detecting incipient cavitation and the best efficiency point of a 60kW centrifugal pump: case study", NDT E Int., vol. 38, n.º 5, pp. 354-358, jul. 2005.
- [49] D. H. Stamatis, Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution. ASQC Quality Press, 1995.
- [50] K. J. McNaughton, Bombas Seleccion, uso y mantenimiento. McGraw-Hill. USA. 1988.
- [51] J. D. Summers-Smith, Mechanical seal practice for improved performance. John Wiley & Sons, 2005.
- [52] N. R. Sakthivel, B. B. Nair, y V. Sugumaran, «Soft computing approach to fault diagnosis of centrifugal pump», Appl. Soft Comput., vol. 12, n.º 5, pp. 1574–1581, 2012.
- [53] H. Towsyfyan, F. Gu, A. D. Ball, y B. Liang, «Tribological behaviour diagnostic and fault detection of mechanical seals based on acoustic emission measurements», Friction, pp. 1–15, 2018.
- [54] H. Towsyfyan, F. Gu, A. D. Ball, y B. Liang, «Modelling acoustic emissions generated by tribological behaviour of mechanical seals for condition monitoring and fault detection», Tribol. Int., vol. 125, pp. 46-58, sep. 2018.
- [55] H. M. Badr y W. H. Ahmed, Pumping Machinery Theory and Practice. New York, United Kingdom: John Wiley & Sons, Incorporated, 2014.
- [56] H. Xue, Z. Li, H. Wang, y P. Chen, «Intelligent diagnosis method for centrifugal Pump System Using Vibration Signal and Support Vector Machine», Shock Vib., vol. 2014, pp. 1-14, 2014.
- [57] S. Farokhzad, H. Ahmadi, y A. Jaefari, «Artificial Neural Network Based Classification of Faults in Centrifugal Water Pump», p. 10. 2010
- [58] A. Al-Braik, O. Hamomd, F. Gu, y A. D. Ball, «Diagnosis of impeller faults in a centrifugal pump based on spectrum analysis of vibration signals», en 11th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, CM 2014.
- [59] O. Hamomd, X. Tian, A. Albraik, F. Gu, y A. Ball, «A new method of vibration analysis for the diagnosis of impeller in a centrifugal pump», p. 11. 2015.
- [60] Y. Yang, H. Zheng, Y. Li, M. Xu, y Y. Chen, «A fault diagnosis scheme for rotating machinery using hierarchical symbolic analysis and convolutional neural network», ISA Trans., ene. 2019.
- [61] B. P. Kamiel, «Vibration based multi fault diagnosis for centrifugal pumps», PhD Thesis, Curtin University, 2015.
- [62] A. Jami y P. S. Heyns, «Impeller fault detection under variable flow conditions based on three feature extraction methods and artificial neural networks», J. Mech. Sci. Technol., vol. 32, n.º 9, pp. 4079–4087, 2018.

- [63] J. S. Rapur y R. Tiwari, «Multi Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps with Time, Frequency and Wavelet-Based Features Using Support Vector Machines», en International Conference on Rotor Dynamics, 2018, pp. 43–57.
- [64] P. P. Harihara y A. G. Parlos, «Sensorless detection of impeller cracks in motor driven centrifugal pumps», en ASME 2008 international mechanical engineering congress and exposition, 2008, pp. 17–23.
- [65] A. Albraik, F. Althobiani, F. Gu, y A. Ball, «Diagnosis of Centrifugal Pump Faults Using Vibration Methods», J. Phys. Conf. Ser., vol. 364, n.º 1, p. 012139, 2012.
- [66] M. Jahangiri, S. Roknizadeh, y S. Alireza, «Clogged Impeller Diagnosis in the Centrifugal Pump Using the Vibration and Motor Current Analysis», J. Appl. Comput. Mech., vol. 4, n.º 4, pp. 310–317, 2018.
- [67] O. Hamomd, S. Alabied, Y. Xu, A. Daraz, F. Gu, y A. Ball, «Vibration based centrifugal pump fault diagnosis based on modulation signal bispectrum analysis», en 2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC), 2017, pp. 1–5.
- [68] N. Sawalhi y R. B. Randall, «Vibration response of spalled rolling element bearings: Observations, simulations and signal processing techniques to track the spall size», Mech. Syst. Signal Process., vol. 25, n.º 3, pp. 846-870, abr. 2011.
- [69] M. A. A. Ismail y N. Sawalhi, «Vibration response characterisation and fault-size estimation of spalled ball bearings», Insight - Non-Destr. Test. Cond. Monit., vol. 59, n.º 3, pp. 149-154, mar. 2017.
- [70] J. C. Garcia-Prada, C. Castejon, y O. J. Lara, «Incipient bearing fault diagnosis using DWT for feature extraction», en 12th IFToMM World Congress, 2007.
- [71] G. Urquizo, «Análisis de vibraciones para deteccion temprana de fallas en cojinetes de tipo anti-friccion», ResearchGate. 2016.
- [72] L. S. Dhamande y M. B. Chaudhari, «Compound gear-bearing fault feature extraction using statistical features based on time-frequency method», Measurement, vol. 125, pp. 63–77, 2018.
- [73] M. Zhang, Z. Jiang, y K. Feng, «Research on variational mode decomposition in rolling bearings fault diagnosis of the multistage centrifugal pump», Mech. Syst. Signal Process., vol. 93, pp. 460–493, 2017.
- [74] S. Tyagi y S. K. Panigrahi, «An improved envelope detection method using particle swarm optimisation for rolling element bearing fault diagnosis», J. Comput. Des. Eng., vol. 4, n.º 4, pp. 305–317, 2017.
- [75] J. Liu, Z. Xu, L. Zhou, Y. Nian, y Y. Shao, «A statistical feature investigation of the spalling propagation assessment for a ball bearing», Mech. Mach. Theory, vol. 131, pp. 336–350, 2019.
- [76] L. S. Dhamande y M. B. Chaudhari, "Detection of combined gear-bearing fault in single stage spur gear box using artificial neural network", Proceedia Eng., vol. 144, pp. 759– 766, 2016.
- [77] K. Yu, T. R. Lin, J. Tan, y H. Ma, «An adaptive sensitive frequency band selection method for empirical wavelet transform and its application in bearing fault diagnosis», Measurement, vol. 134, pp. 375-384, feb. 2019.
- [78] N. Sawalhi, W. Wang, y A. Becker, «Vibration signal processing for spall size estimation in rolling element bearings using autoregressive inverse filtration combined with bearing signal synchronous averaging», Adv. Mech. Eng., vol. 9, n.º 5, 2017.
- [79] H. Alian, S. Konforty, U. Ben-Simon, R. Klein, M. Tur, y J. Bortman, "Bearing fault detection and fault size estimation using fiber-optic sensors", Mech. Syst. Signal Process., vol. 120, pp. 392–407, 2019.
- [80] A. Bourdon, S. Chesné, H. André, y D. Rémond, «Reconstruction of angular speed variations in the angular domain to diagnose and quantify taper roller bearing outer race fault», Mech. Syst. Signal Process., vol. 120, pp. 1–15, 2019.

- [81] X. Yan y M. Jia, "Application of CSA-VMD and optimal scale morphological slice bispectrum in enhancing outer race fault detection of rolling element bearings", Mech. Syst. Signal Process., vol. 122, pp. 56–86, 2019.
- [82] D. Jena, M. Singh, y R. Kumar, «Radial ball bearing inner race defect width measurement using analytical wavelet transform of acoustic and vibration signal», Meas. Sci. Rev., vol. 12, n.º 4, pp. 141–148, 2012.
- [83] M. A. Ismail, N. Sawalhi, y T.-H. Pham, «Quantifying bearing fault severity using time synchronous averaging jerk energy», en 22nd International Congress on Sound and Vibration. Florence, Italy, 2015.
- [84] A. Krishnakumari, M. Saravanan, G. Venkatesan, y S. Jain, "Application of Zhao-Atlas-Marks Transforms in Non-stationary Bearing Fault Diagnosis", Procedia Eng., vol. 144, pp. 297–304, 2016.
- [85] X. Zhang, Z. Liu, J. Wang, y J. Wang, «Time-frequency analysis for bearing fault diagnosis using multiple Q-factor Gabor wavelets», ISA Trans., vol. 87, pp. 225–234, 2019.
- [86] S. Kulkarni y S. B. Wadkar, «Experimental Investigation for Distributed Defects in Ball Bearing using Vibration Signature Analysis», Procedia Eng., vol. 144, pp. 781–789, 2016.
- [87] K. D. Kompella, M. V. G. Rao, y R. S. Rao, "Bearing fault detection in a 3 phase induction motor using stator current frequency spectral subtraction with various wavelet decomposition techniques", Ain Shams Eng. J., 2017.
- [88] B. Nesbitt, «Handbook of Pumps and Pumping: Pumping Manual International». Jordan Hill, United Kingdom: Elsevier Science & Technology, 2006.
- [89] J. A. García Rodríguez, Teoría de máquinas e instalaciones de fluidos». Zaragoza, España: Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2013.
- [90] J. Luo y Z. Niu, «Jet and Shock Wave from Collapse of Two Cavitation Bubbles», Sci. Rep., vol. 9, n.º 1, p. 1352, dic. 2019.
- [91] H. P. Bloch, «Pump Wisdom: Problem Solving for Operators and Specialists». John Wiley & Sons, 2011.
- [92] U. Sánchez Domínguez, «Máquinas hidráulicas». Alicante, España. 2013.
- [93] S. de las Heras, «Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas». Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- [94] J. Álvarez, H. Quintero, y L. Juan, «Detección de cavitación en una bomba centrífuga utilizando análisis de envolvente». 2014
- [95] F. A. T. F. Gu y A. Ball, «Monitoring of Cavitation in Centrifugal Pumps using Spectral Entropy of Vibro-acoustic Measurements», Univ. Hudders., 2010.
- [96] Y. Luo, S. Yuan, J. Yuan, y J. Lu, «Research on Characteristic of the Vibration Spectral Entropy for Centrifugal Pump», system, vol. 14, p. 16, 2014.
- [97] M. Rakibuzzaman, K. Kim, y S.-H. Suh, «Numerical and experimental investigation of cavitation flows in a multistage centrifugal pump», J. Mech. Sci. Technol., vol. 32, n.º 3, pp. 1071–1078, 2018.
- [98] M. J. Kim, H. B. Jin, y W. J. Chung, «A Study on Prediction of Cavitation for Centrifugal Pump», vol. 6, n.º 12, p. 6, 2012.
- [99] M. Zubicaray, Bombas : teoría, diseño y aplicaciones. México: Limusa Noriega, 2000.
- [100] S. V. Nivelo Jara y D. J. Romero Rodríguez, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos rotativos con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en rodamientos», nov. 2014.

ANEXOS

DETECCIÓN DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MULTIETAPA VERTICAL MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Calderón Juan Carlos (jcalderonm1@est.ups.edu.ec), Montalván Felipe (fmoltanvan@est.ups.edu.ec).

Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales – Ingeniería Mecánica Asignatura: Análisis de vibraciones, Cuenca – Ecuador, Fecha de realización: 19/07/2019

Presentación de la práctica

En la presente práctica se realiza la detección de cavitación de una bomba centrífuga multietapa de eje vertical marca Goulds e-SV modelo 3SV10GE4F520 mediante el análisis del espectro de vibración con el uso de un analizador de vibraciones marca ADASH VA4 Pro.

1. Requisitos

Para realizar de manera satisfactoria esta práctica es necesario tener los conocimientos básicos sobre el funcionamiento de una bomba centrífuga, el funcionamiento del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro y los fundamentos de la vibración mecánica, por lo tanto, se recomienda realizar una lectura de los siguientes textos:

- Funcionamiento de una bomba centrífuga y cavitación: [1] pág. 142; 146; 153; 178-184.
- Manual de usuario: ADASH VA4Pro [2] pág. 8,10-12, 17, 18, 31-38, 44,45.
- Introducción al análisis de vibraciones: [3] pág. 16, 22-25, 27-30, 53-56, 63-68.
- Uso del analizador de vibraciones Adash VA4pro. Guía de práctica de laboratorio.[4]

2. Precauciones

El estudiante debe considerar antes de desarrollar la práctica los siguientes puntos:

- · Respetar las normas de seguridad del laboratorio
- · Tener supervisión del personal de los laboratorios durante el desarrollo.
- Verificar que la batería del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro se encuentre con una carga mayor al 50%.

3. Objetivo General

 Realizar mediciones de vibraciones mecánicas para detectar cavitación en una bomba centrífuga multietapa vertical mediante el analizador de vibraciones ADASH VA4Pro.

4. Objetivos Específicos

- · Comprender y analizar el funcionamiento de un sistema de bombeo.
- · Provocar el estado de cavitación en una bomba centrífuga multietapa vertical.

• Comparar el espectro de vibración de la bomba multietapa en buen estado con un espectro de cavitación provocada mediante el analizador de vibraciones ADASH VA4 Pro.

5. Equipos, instrumentación y software

Tabla 1.	Tabla de	e equipos.	instrumentos	v software
I abia 1.	1 abia de	equipos,	monumentos	y soltware

Descripción	Marca	Serie
Bomba Centífuga Multietapa	GOULDS	e-SV
Analizador de vibraciones	ADASH	VA4 Pro
Acelerómetro	ADASH	$\mathrm{A}~102-\mathrm{A1}$

6. Normas de seguridad

- · Se requiere el uso obligatorio de mandil, tapones auditivos y gafas de seguridad.
- · Recogerse el cabello en caso de ser necesario.
- No acercarse ni manipular la bomba mientras esté en funcionamiento.
- En caso de producirse un accidente o lesión, comunicar inmeditamente al personal técnico encargado.

7. Exposición

7.1. Bomba Centrífuga Multietapa Vertical

Una bomba centrífuga multietapa de eje vertical es una bomba con tránsito de flujo axial, consiste en una base y un cabezal de bomba, en su interior se alojan una serie de impulsores mismos que con la ayuda de un motor mueven la masa del líquido por etapas con el objetivo de obtener mayor cabeza de carga y de esta manera elevar el fluido a mayores alturas. La Figura 1, ilustra una bomba centrífuga multietapa de eje vertical, esta clase de máquina hidráulica se utilizará para el desarrollo de la presente guía de práctica.



Figura 1. Bomba Centrífuga multietapa vertical. Marca GOULDS e-SV

7.2. Partes de una bomba centrífuga multietapa vertical

En la Figura 2, se muestra las principales partes de una bomba centrífuga multietapa vertical marca GOULDS para la serie e-SV, modelo 3SV10GE4F20 mismos que se describen en la Tabla 2.



Figura 2. Esquema de partes. Bomba Goulds Multietapa

Partes principales de una bomba centrífuga multietapa vertical.			
Número	Descripción	Material	
1	Cuerpo de la bomba	Acero inoxidable	
2	Impulsor	Acero inoxidable	
3	Difusor	Acero inoxidable	
4	Caja	Acero inoxidable	
5	Eje	Acero inoxidable	
6	Adaptador	Hierro fundido	
7	Base	Aluminio	
8	Acople	Aluminio	
9	Placa de sello	Acero inoxidable	
10	Sello mecánico	Carburo de silicio/Carbono/Viton	
11	Elastómeros	Viton	
12	Separador de impulsores	Acero inoxidable	
13	Manga de eje y buje	Carburo de tungsteno	
14	Tapones de llenado/Drenaje	Acero inoxidable	

Tabla 2. Partes principales de una bomba centrífuga multietapa vertical

Partes principales de una bomba centrífuga multietapa vertical.			
15	Varillas de unión	Acero al carbono / Zincado	
16	Anillo de desgaste	PPS (polisulfuro de fenileno)	
17	Junta de estanquidad	Acero inoxidable	

7.3. Funcionamiento de una bomba centrífuga multietapa vertica

Una bomba centrífuga multietapa vertical ideal para bombear bajos caudales a grandes alturas, cuenta con un cuerpo cilíndrico que alberga un kit de diez impulsores cerrados, cada uno de ellos se encuentra encerrado en un difusor con toberas que ayudan a la compresión paulatina del fluido por etapas a caudal constante hasta quedar presurizado en la cámara de presión y desfogar el mismo a través de la tobera de descarga de la carcasa.

En la Figura 3, se indica a detalle el funcionamiento de la bomba centrífuga multietapa donde el fluido (flecha azul) es conducido al ojo del primer impulsor, luego por la acción centrífuga del mismo es dirigido al primer difusor como se muestra en el detalle A. El difusor, permite el paso del fluido al segundo impulsor (detalle B), nuevamente la acción centrífuga del impulsor lleva el fluido (flecha a amarilla) al segundo difusor (detalle A) que a su vez conduce el fluido al tercer impulsor. Por último el tercer impulsor lleva el fluido representado por la flecha roja hacia el último difusor donde alcanza la presión máxima de bombeo y esta se trasnmite alrededor de la caja (ver Figura 4) hasta desfogar por la brida de salida.





Figura 3. Principio de funcionamiento de una bomba centrífuga multietapa vertical



Figura 4. Principio de funcionamiento de una bomba centrífuga multietapa vertical – descarga de flujo

7.4. Cavitación

La cavitación es una condición anormal en los sistemas de bombeo. Es considerada como el problema más común que ocurre en el lado de succión de las bombas centrífugas. La cavitación surge cuando la presión del fluido dentro de la bomba cae por debajo de la presión de vapor del mismo generando burbujas de vapor. Esta formación de burbujas puede tener efectos nocivos en el interior de la bomba provocando erosión tanto en la carcasa como en el resto de todos sus componentes. La Figura 5, ilustra las fases de implosión de una burbuja desde su formación hasta su colapso final con la estructura. El problema se ve agravado por el hecho de que el impulsor está encerrado, por lo general, el primer signo notable de cavitación es la aparición de ruidos y vibraciones severas.



Burbuja Inicial Inicio del choque Ingreso del líquido Formación del Jet Impacto y erosión

Figura 5. Etapas de implosión de una burbuja por cavitación

7.5. Carga de succión neta positiva

La NPSH "*Net Positive Suction Head*", por sus siglas en inglés representa la carga de succión neta positiva. Cuando el agua fluye a través de la bomba, la presión en la entrada y en la tubería de succión tiende a disminuir debido a las altas velocidades del flujo. Si la reducción va más allá de la presión de vapor del agua, se producirá la vaporización y se formarán burbujas de vapor en el seno del líquido.

Los fabricantes de bombas prueban cada diseño para determinar los niveles de presión requeridos con el fin de evitar la cavitación en el sistema y reportan los resultados como "Carga de Succión Neta Positiva requerida" NPSHr en condiciones de operación de caudal y carga. Es responsabilidad del diseñador del sistema de bombeo garantizar que la carga de succión neta positiva disponible NPSHd sea mayor a la carga de succión neta positiva requerida NPSHr [6].

El NPSH disponible en función del sistema de succión de la bomba, se calcula en metros de columna de agua, mediante la siguiente fórmula.

NPSHd =
$$H_{atm} - H_{vap} + h_s + \Delta Hs$$
 Ecuación 1

Donde:

NPSH d = Carga neta de succión positiva disponible [mca].

Hatm = Presión atmosférica [Bar]

Hvap = Presión de vapor [Bar].

hs = Altura estática de succión [m]

 Δ Hs = Pérdida de carga por fricción de accesorios y tubería [m].

7.6. Sistema de Bombeo

La estación de bombeo se diseñó para adquirir señales acústicas y de vibración en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical con varios fallos provocados artificialmente. Los requerimientos determinados para la estación son: 1) Proceso a escala con instrumentación industrial para el control

y manipulación de variables (caudal, presión, velocidad); 2) Monitoreo y adquisición de variables manipuladas y perturbaciones; 3) Componentes mecánicos internos de la bomba con diferentes fallos y diferentes severidades; 4) Normas y buenas prácticas de ingeniería para montaje de estaciones de bombeo; 5) Posibilidad de variar caudal y altura de la bomba; 6) Disponer suficiente espacio para un adecuado mantenimiento y cambio de fallos. La Figura 6, muestra un diagrama P&D del sistema de bombeo de una bomba centrífuga multietapa de eje vertical marca GOULDS e – SV.



Figura 6. Diagrama de instrumentación y proceso (P&ID), según la norma ISA-S5.4

7.7. Provocación del estado de Cavitación

Para provocar el estado de cavitación en la entrada de la bomba, es necesario establecer las condiciones iniciales de operación trabajando en el punto de máxima eficiencia (n=58%) correspondiente a un caudal de Q=15 gpm (60 l/min) a una cabeza de H=87 m (287 feet) como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Curva altura-caudal (a), curva-rendimiento caudal (b)

Para disminuir la carga neta de succión positiva disponible (NPSHd) es necesario estrangular la válvula en la succión (Ver Figura 8) hasta lograr la caída del 3% en la cabeza o altura entregada por la bomba [7].





Figura 8. Sistema de bombeo planta A - LACTI

En la Figura 9, se muestra la gráfica H vs NPSHd donde se observa la caída del 3% correspondiente a un NPSHd de 0,54 m a una cabeza entre 85 a 87 mca, en este punto se obtiene el estado de cavitación desarrollada.



Figura 9. Curva H-NPSHd

Para simular la cavitación en una bomba centrífuga se trabaja a la velocidad normal de la bomba 3500 rpm que equivale a una frecuencia de 60 Hz aproximadamente, la cual permanecerá constante.

Para perturbar el sistema generando cavitación basta con cerrar de forma gradual la válvula en la succión, esto provocará un aumento en las pérdidas a la entrada de la bomba por ende una sustancial caída de la altura neta de entrada positiva disponible (NPSHd) la cual será menor a la altura neta de entrada requerida por el fabricante (NPSHr) en consecuencia la bomba entrará en el fenómeno de cavitación ya que la presión de entrada hacia la bomba será menor que la presión de vapor del líquido. De modo que:

NPHSdisponible < NPHSrequerida = CAVITACIÓN

8. Proceso y procedimiento

8.1. Proceso

Para el desarrollo de la práctica en la Figura 10, se presenta el flujo de proceso que empieza desde la preparación de la bomba donde se revisa que todos los componentes esten colocados y los pernos bien ajustados, luego se procede a configurar los parámetros de medición del analizador de vibraciones ADASH VA4 Pro, configurados estos parámetros se procede a montar el acelerometro para dar paso al encendido de la bomba. Encendida la bomba en sus condiciones de operación se procede a darle una perturbacion en la succion mediante la válvula de globo en la entrada, estabilizado el flujo, se procede a la adquisición de datos mediante el analizador de vibraciones siguendo la guía de proceso, terminada la adquisición de datos se procede al paro de la bomba siguinedo un protocolo de seguridad, finalmente se analiza el espectro obtenido y se compara con el de estado normal sin fallo.



Figura 10. Proceso para la adquisición de las señales de vibración en una bomba centrífuga multietapa

8.2. Procedimiento

8.2.1. Preparación de la bomba centrífuga multietapa

- Realizar una inspección visual de la bomba, verificando el montaje de todos los elementos del kit de impulsión como se presentó en la Figura 3.
- Verificar visualmente que no exista presencia de fugas en las bridas y acoples tanto en la succión como en la descarga.
- 3. Verificar que las plantas A y B estén en óptimo funcionamiento y no estén ejecutanto otra operación.

8.2.2. Configuración del equipo de medicion de vibraciones

• Para ADASH VA4Pro

1. Conectar el cable del acelerómetro al canal de entrada 1 del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro, tal como se indica en la figura 11.



Figura 11. Conexión de acelerómetro en el analizador de vibraciones

- 2. Encender el analizador de vibraciones ADASH VA4Pro.
- 3. Seleccionar el modo "ANALIZADOR" y pulsar el botón "OK".
- 4. Pulsar el botón que indica la opción de "PROYECTO", seleccionar "Nuevo conjunto" y pulsar el botón "OK" (para desplazarse usar los botones de cursor, para seleccionar OK).
- 5. Establecer un nombre a la prueba y pulsar el botón "OK".
- 6. Seleccionar la prueba creada y pulsar el botón "OK".
- Pulsar el botón que indica la opción "SENSORES", seleccionar "AC 1" y pulsar el botón "OK".
- 8. Establecer los parámetros de configuración del acelerómetro según como se indica en la tabla 3 y pulsar el botón "GUARDAR", (configurar si es necesario).

ICP	On
Sensibilidad [mV/g]	100
Unidad	g
Posición [°]	0
Grupo de máquinas ISO 1	1
Fundación de la máquina ISO rígido	Rígido
Tipo de rodamiento no definido	No definido

Tabla 3. Configuración del acelerómetro

• Medición de ISO – RMS

- 1. Pulsar opción "Medida".
- 2. Seleccionar "Nuevo básico" y pulsar "OK".

- 3. Seleccionar la opción "ISO RMS" y pulsar "OK".
- 4. Seleccionar "Guardar" y pulsar "OK".

• Medición de espectro

- 1. Pulsar opción "Medida".
- 2. Seleccionar "Nuevo avanzado" y pulsar "OK".
- 3. Asignar los valores mostrados en la Tabla 4, seleccionar "Guardar" y pulsar "OK".

Medición			
Tipo	Espectro		
Canal	1		
Ventana	hanning		
Unidades	m/s ²		
Zoom de espectro	no		
Banda Fmin [Hz]:	10		
Rango [Hz]	1600		
Líneas	32000		
Promediando	No		
Promedios	_		
Solapamiento	50%		

Tabla 4. Configuración de los parámetros para la medición

8.2.3. Montaje del acelerómetro.

El montaje del acelerómetro en la máquina, se realizará por acople de conector roscado en la carcasa fundida de forma perpendicular al eje de transmisión de la bomba. El montaje y desmontaje correcto del acelerómetro sobre la superficie que se desea colocar el acelerómetro se ilustra en la Figura 12.



Figura 12. Montaje del acelerómetro perpendicular al eje de transmisión de la bomba.

8.2.4. Puesta en marcha de la bomba.

Para poner en marcha una bomba centrífuga hay que tener presente las siguientes consideraciones:

- a) Comprobar todos los purgadores, bridas, líneas, etc., asegurándose que no existan fugas.
- b) Si la bomba está recién instalada, comprobar que puede girar sin dificultad rodándola a mano. Comprobar que el sentido de rotación del motor sea el correcto.
- c) Comprobar los cierres líquidos (sello mecánico).
- d) Cerrar la válvula de impulsión, abrir la de aspiración plenamente y llenar de líquido la carcasa.
 Púrguese el aire o vapor por el purgador situado en la parte más alta de la carcasa.
- e) Poner en marcha la bomba hasta alcanzar una cabeza de trabajo entre 85 y 87 mca a un caudal de 60 lt/min y luego abrir la válvula de impulsión lentamente y asegurarse que la presión se mantenga en su valor. Hay que tener en cuenta que si se abre rápido la válvula de impulsión, se puede originar una pulsación repentina con la pérdida de la succión.

8.2.5. Adquisición de datos en condición normal.

El proceso de adquisición de datos que se detalla a continuación se toma con el acelerómetro perpendicular a la boquilla de succión como se muestra en la Figura 10.

Una vez montado el acelerómetro y configurada las mediciones de vibración se procede a medir la vibración en la bomba centrífuga multietapa.

- 1. Verificar que la bomba este trabajando a una velocidad de giro de 3500 RPM.
- 2. En el medidor de vibraciones pulsar el botón "MEDIR" (si el analizador de vibraciones le indica un aviso de "¿Guardar los datos?", pulsar el botón que indique la opción "NO".)
- 3. Esperar hasta que finalice la prueba (tiempo estimado de 5 segundos).
- 4. Apagar la bomba.
- 5. Retirar el acelerómetro de la bomba.

8.2.6. Paro de la bomba.

Para el paro final de la bomba hay que tener en cuenta estas importantes recomendaciones:

a) Cerrar la válvula de impulsión; esto reduce la carga del motor y evita el retroceso si la válvula de retención no funcionase.

b) Apagar el variador de frecuencia.
c) Dejar la bomba llena de líquido a menos que el producto tenga un alto punto de congelación o viscosidad. En este caso vaciar la bomba cerrando previamente la válvula de aspiración. Abrir la purga de presión de la bomba. Volver a cerrar esta purga. Si la bomba se deja preparada para entrar en servicio, dejar la aspiración abierta.

d) Si se va a hacer en la bomba alguna reparación, cerrar todas las válvulas de bloqueo y vaciar la bomba.

8.2.7. Análisis del espectro.

En la Figura 13, se presenta el espectro captado por el equipo ADASH VA4Pro sobre la bomba multietapa en condiciones normales. La figura 14 muestra el sistema de referencia frecuencia – amplitud en el cual se graficará en forma manual el espectro de cavitación obtenido por el analizador de vibraciones.



Figura 13. Espectro de vibración en condiciones normales.

Espectro en condiciones de cavitación inducida.



Figura 14. Espectro con cavitación

9. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Recomendaciones

10. Referencias

- [1] Heras, Salvador, "Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas". Universitat Politècnica de Catalunya 2011.
- [2] G. White, Introducción al Análisis de Vibraciones. Massachusetts, United States: Azima DLI, 2010.
- [3] M. M. Ángel José, G. A. Leví Víctor, y D. de L. S. Miguel Vicente, Mantenimiento: Técnicas y aplicaciones industriales. Grupo Editorial Patria, 2017.
- [4] Ortiz F. Christian, Pérez R. Iván."Adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas". Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca. 2016.
- [5] F. Al Thobiani, "The Non-intrusive Detection of Incipient Cavitation in Centrifugal Pumps", doctoral, University of Huddersfield, 2011.
- [6] R. L. Mott, Mecánica de fluidos (6a. ed.). Naucalpan de Juárez: Pearson Educación, 2006.
- [7] Heras, Salvador de las. Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas, Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.

LISTA DE LOS ESTUDIANTES DE INGENIERÍA QUE REALIZARON Y CALIFICARON LA GUÍA DE PRÁCTICA

Núm.	Nombre	Fecha	Carrera	Calificación
1	Holger Llivicura	22/07/2019	Ing. Mecánica	17/21
2	Gilson Correa	22/07/2019	Ing. Mecánica	18/21
3	Alexander Cangá	22/07/2019	Ing. Mecánica	20/21
4	Ana Calle	22/07/2019	Ing. Mecánica	19/21
5	Jorge Yanza	22/07/2019	Ing. Mecánica	18/21
6	Macarena Serrano	22/07/2019	Ing. Mecánica	19/21
7	Pablo Ávila	22/07/2019	Ing. Mecánica	18/21
8	Franklin Altamirano	22/07/2019	Ing. Mecánica	19/21
9	Andrés Vacacela	22/07/2019	Ing. Mecánica	17/21
10	David Montero	22/07/2019	Ing. Mecánica	19/21