

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

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

**PROYECTO TÉCNICO:**

**“EVALUACIÓN DE LAS SEÑALES DE VIDEO PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN BOMBAS CENTRÍFUGAS MULTITAPA DE EJE VERTICAL EMPLEANDO LA TÉCNICA ESPEJO”**

**AUTORES:**

DAVID ANDRÉS ORMAZA SALDAÑA  
CHRISTIAN RENÉ ORTEGA MACHUCA

**TUTOR:**

DR. RENÉ VINICIO SÁNCHEZ LOJA

CUENCA - ECUADOR

2021

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, David Andrés Ormaza Saldaña con documento de identificación N° 0106029499 y Christian René Ortega Machuca con documento de identificación N° 0104770474, 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: **“EVALUACIÓN DE LAS SEÑALES DE VIDEO PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN BOMBAS CENTRÍFUGAS MULTITETAPA DE EJE VERTICAL EMPLEANDO LA TÉCNICA ESPEJO”**, 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 digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio de 2021.



David Andrés Ormaza Saldaña  
C.I. 0106029499



Christian René Ortega Machuca  
C.I. 0104770474

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DE LAS SEÑALES DE VIDEO PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN BOMBAS CENTRÍFUGAS MULTIETAPA DE EJE VERTICAL EMPLEANDO LA TÉCNICA ESPEJO”**, realizado por David Andrés Ormaza Saldaña y Christian René Ortega Machuca, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio de 2021.



Dr. René Vinicio Sánchez Loja

C. I. 0103409587

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, David Andrés Ormaza Saldaña con documento de identificación N° 0106029499 y Christian René Ortega Machuca con documento de identificación N° 0104770474, autores del trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DE LAS SEÑALES DE VIDEO PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN BOMBAS CENTRÍFUGAS MULTIETAPA DE EJE VERTICAL EMPLEANDO LA TÉCNICA ESPEJO”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, julio de 2021.



David Andrés Ormaza Saldaña  
C.I. 0106029499



Christian René Ortega Machuca  
C.I. 0104770474

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico lo dedico a quienes con su amor supieron inculcar en mí el deseo de superación Walter y Diana, mis padres; a mis hermanos Carolina y Daniel, con quienes hemos compartido cada uno de nuestros días no solo como hermanos, sino como amigos, y a toda mi familia por caminar juntos y permitirme con su apoyo alcanzar mis sueños y metas.

Desde lo más profundo de mi corazón, gracias.

*David Andrés Ormaza Saldaña*

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que me acompañaron en el recorrido de formación académica, muchas de las cuales han sido un soporte, primero y antes que todo, dar gracias a Dios, fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo este periodo de formación.

Esta tesis va dedicada a mis padres Máxima Machuca y Milton Ortega por siempre ser mi ejemplo a seguir y lucha ante las adversidades, a mis hermanos Verónica y Juan Diego para los cuales espero pueda ser un buen ejemplo, a mis abuelitos Idelia, Serafín, Laura y Héctor que con su amplia experiencia y conocimientos me orientaron en momentos de angustia. A María Emilia Fernández de Córdova y Familia por su motivación y apoyo incondicional en los momentos más difíciles en la realización de este trabajo.

Mil veces gracias.

*Christian Rene Ortega Machuca*

## AGRADECIMIENTOS

Al Padre celestial y a María Madre por bendecir todos y cada uno de mis pasos que he dado durante toda mi vida estudiantil.

A mis padres por esfuerzo, comprensión, tolerancia y sobre todo amor este es mi triunfo y triunfo de ustedes. han sido incondicionales.

A mis hermanos y cuñado que precedieron en la consecución de sus sueños, y que hoy con ellos comparto el mío.

A mi enamorada, de tu mano he caminado este último trecho de mi profesionalización solo puedo decir gracias.

A Christian Ortega con quien hemos desarrollado este trabajo de investigación, de seguro que el tiempo dedicado al mismo nos será recompensado en nuestro futuro profesional.

A la Universidad Politécnica Salesiana que ha sido mi hogar estos años de aprendizaje, me llevo los mayores recuerdos y sobre todo el carisma salesiano que han predicado en sus aulas.

Al grupo de investigación GIDTEC, en especial a mi director de proyecto, Ingeniero Vinicio Sánchez quien incentivó y facilitó los conocimientos necesarios para la culminación de esta tesis; y de igual manera a los Ingenieros Mecánicos Cristian Torres, Julio Sigüenza y Mauricio Villacis, quienes estuvieron para colaborar en el éxito de este proyecto.

Gracias.

*David Andrés Ormaza Saldaña*

## AGRADECIMIENTOS

Dicen que la mejor herencia que nos pueden dejar los padres son los estudios, primero quiero agradecer a Dios y a María Auxiliadora por las bendiciones que hasta este momento de mi vida.

A mis padres gracias a su esfuerzo y confianza en toda mi carrera estudiantil y personal me han ayudado a alcanzar mis metas y espero lo sigan haciendo durante mucho tiempo más.

A mis abuelitos por siempre llenarme de sermones llenos de experiencia que me ayudaron a seguir el camino correcto a lo largo de toda mi vida.

A mis hermanos por siempre apoyarme y aguantarme sin importar la situación y por haber confiado siempre en mí.

A mi amigo David Ormaza por su amistad brindada, esfuerzo y dedicación para la realización de este trabajo.

A mi enamorada María Emilia Fernández de Córdova y familia por su apoyo y consejos en las etapas más difíciles de desarrollo de este trabajo.

A los miembros del GIDTEC e Ing. René Vinicio Sánchez y a todos mis maestros que todos sus conocimientos se vieron plasmados en la realización de este trabajo

A los Ingenieros Cristian Torres, Julio Siguencia, Franco Cajas y Mauricio Villacis, que nos brindaron sus conocimientos para solventar cualquier inconveniente durante el desarrollo del proyecto.

A la Universidad Politécnica Salesiana, a la FEUPS por su formación académica de excelencia y humana, por las experiencias adquirida dentro y fuera de las aulas.

Gracias Salesiana.

*Christian Rene Ortega Machuca*



## RESUMEN

El presente trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico: “Evaluación de las señales de video para la detección de fallos en bombas centrífugas multietapa de eje vertical empleando la técnica espejo”, con base en el mantenimiento basado en la condición (MBC), en el cual se realizó la adquisición de señales de vibración y video de una bomba centrífuga multietapa de eje vertical, simulando fallos tales como: cavitación y desbalanceo, con el objetivo de evaluar las señales de video empleando la técnica espejo para la detección de fallos en bombas centrífugas multietapa de eje vertical.

El capítulo uno, presenta la introducción al proyecto técnico, el problema, los antecedentes, el alcance, delimitación y los objetivos generales y específicos planteados para el trabajo de titulación. Se justifica también, la importancia del monitoreo de señales de vibración y video para la detección de fallos.

El capítulo dos, establece el marco teórico del proyecto donde se define argumentos relevantes como el mantenimiento basado en la condición, el monitoreo de la condición, técnicas de monitoreo de la condición, funcionamiento, tipos y fallos en bombas centrífugas, análisis de vibraciones en el dominio del tiempo y frecuencia en maquinaria rotativa, así como la acondicionamiento de los sensores a usar y por último las señales de video, técnica espejo como técnica usada para el procesamiento de señales video. En las señales de video, se profundiza el tema debido a que el procesamiento de este tipo de señales se lo realiza mediante el software DragónVisión® aplicando la técnica espejo es un proceso innovador dentro del monitoreo de la condición en maquinaria rotativa. Además, se presenta una investigación bibliográfica para la simulación de fallos de cavitación y desbalanceo en bombas centrífugas multietapa de eje vertical.

El capítulo tres, muestra el desarrollo e implementación de la metodología experimental del proyecto en la cual se detallan paso a paso las acciones ejecutadas para la adquisición de señales de vibración y video, donde se consideran temas como: emplazamiento, acondicionamiento de sensores y software, el procedimiento para la validación de la línea base y las diferentes condiciones en que se realizaron los experimentos con la finalidad de generar una base de datos del funcionamiento de la bomba centrífuga multietapa en condiciones normales y con la simulación de fallos de cavitación y desbalanceo en niveles de severidad (leve, moderado y severo).

El capítulo cuatro, expone la metodología para la evaluación de resultados, los resultados del proyecto presentados en tablas de evaluación donde se puede apreciar los valores de frecuencia obtenidos con su respectiva discusión de resultados. Finalmente, se presentan la discusión de resultados, conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros que se pueden dar con la continuación de esta investigación, todo esto han sido fruto de toda la experticia adquirida en la realización de este trabajo técnico.

*Palabras clave: bomba centrífuga, cavitación, desbalanceo, evaluación, técnica espejo, vibración, video.*

## ABSTRACT

The present degree work made to obtain the Title of Mechanical Engineer: " Evaluation of video signals for the detection of failures in multistage centrifugal pumps with vertical axis using the mirror technique ", based on maintenance based on the condition (MBC), in which the acquisition of vibration and video signals from a vertical axis multistage centrifugal pump was performed, simulating failures such: cavitation and unbalance, with the objective to evaluating the video signals using the mirror technique for the detection of failures in multistage centrifugal pumps with vertical axis.

Chapter one presents the introduction to the technical project, the problem, the background, the scope, delimitation and the general and specific objectives set for the degree work. The importance of monitoring vibration and video signals for fault detection is also justified.

In the video signals, the subject is deepened because the processing of this type of signal through the DragónVisión® software applying the sub-pixel technique is an innovative process within the monitoring of the condition in rotating machinery. In addition, a bibliographic investigation is presented for the simulation of cavitation and unbalance failures in vertical axis multistage centrifugal pumps.

Chapter two establishes the theoretical framework of the project where relevant arguments are defined such as condition-based maintenance, condition monitoring, condition monitoring techniques, operation, types and failures in centrifugal pumps, vibration analysis in the time and frequency domain in rotating machinery, as well as the adequacy of the sensors to be used and finally video signals, sub-pixel technique as a technique used for video processing.

Chapter three shows the development and implementation of the experimental methodology of the project in which the actions carried out for the acquisition of vibration and video signals are detailed step by step, where are considered topics such : location, adaptation and installation of sensors, software conditioning, the procedure for the validation of the baseline and the different conditions in which the experiments were carried out, in order to, generate a database of operation of the multistage centrifugal pump under normal conditions and with the simulation of failures of slight, moderate and severe cavitation and imbalance.

Chapter four, exposes the methodology for the evaluation of results, the results of the project are presented in evaluation tables where the frequency values obtained can be appreciated with their respective discussion of results where the reason why the data varies is explained.

Finally, the discussion of results, conclusions, recommendations and future works that can be given with the continuation of this research are presented, all this has been the result of all the expertise acquired in the realization of this technical work.

*Keywords: centrifugal pump, cavitation, imbalance, evaluation, mirror technique, vibration, video.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	2
CERTIFICACIÓN .....	3
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD.....	4
DEDICATORIA.....	5
DEDICATORIA.....	6
AGRADECIMIENTOS.....	7
AGRADECIMIENTOS.....	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	14
ÍNDICE DE TABLAS .....	15
1 CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Planteamiento del problema. ....	17
1.1.1 Antecedentes.....	17
1.1.2 Importancia y alcances .....	18
1.1.3 Delimitación.....	19
1.2 Objetivos .....	19
1.2.1 Objetivo General.....	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	20
2 CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Mantenimiento basado en la condición.....	21
2.2 Monitoreo de la condición.....	22
2.3 Mantenimiento en bombas.....	23
2.4 Técnica de monitoreo de la condición: Análisis de vibraciones. ....	24
2.5 Vibración .....	27
2.5.1 Señal de vibración. ....	27
2.5.2 Ventajas y limitaciones del monitoreo de las señales de vibración. ....	29
2.5.3 Señales de vibración en el dominio del tiempo.....	30
2.5.4 Señales de vibración en el dominio de la frecuencia. ....	32
2.6 Patrones de fallos de vibraciones en bombas centrífugas .....	33

2.7	Bomba centrífuga.....	34
2.7.1	Bomba hidráulica.....	34
2.7.2	Funcionamiento de una bomba centrífuga.....	34
2.7.3	Clasificación general de las bombas.....	35
2.7.4	Bombas centrífugas multietapa de eje vertical.....	35
2.7.5	Caracterización de la bomba centrífuga multietapa vertical modelo 3SV10GE4F20.....	36
2.7.6	Patrón de vibración de bomba centrífuga multietapa vertical 3SV10GE4F20.....	37
2.7.7	Fallos en bombas centrífugas.....	38
2.8	Cavitación en bombas centrífugas multietapa de eje vertical.....	39
2.8.1	Cavitación y sus tipos.....	39
2.8.2	Análisis causa-raíz para cavitación.....	40
2.8.3	Síntomas de cavitación.....	41
2.8.4	Efectos que produce la cavitación.....	42
2.8.5	Monitoreo adecuado para la cavitación en bombas centrífugas.....	43
2.9	Desbalanceo en bombas centrífugas multietapa de eje vertical.....	44
2.9.1	Desbalanceo y sus tipos.....	44
2.9.2	Síntomas de desbalanceo.....	45
2.9.3	Efectos que produce el desbalanceo.....	46
2.9.4	Monitoreo adecuado para el desbalanceo en bombas centrífugas.....	46
2.10	Simulación de fallos.....	47
2.10.1	Simulación fallo de cavitación.....	47
2.10.2	Simulación de fallo de desbalanceo.....	48
2.11	Señales de video.....	50
2.11.1	Ventajas y limitaciones del monitoreo de señales de video.....	50
2.11.2	Técnicas de procesamiento de señales de video: Técnica espejo:.....	51
2.11.3	DragónVisión®.....	52
2.11.4	Características de hardware y video óptimas para DragónVisión®.....	54
3	CAPÍTULO 3. – ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE MONITOREO DE LA CONDICIÓN ..	57
3.1	Metodología para adquisición de señales de video y vibración .....	57
3.1.1	Banco de pruebas experimentales .....	57
3.2	Proceso y procedimiento de experimentación.....	59
3.2.1	Etapas 1: Acondicionamiento del banco de pruebas experimental para bombas centrífugas.....	60
3.2.2	Etapas 2: Emplazamiento de los sensores .....	63

3.2.3	Etapa 3: Adquisición de señales .....	65
3.2.4	Etapa 4: Exportación de señales de vibración y transferencia de video.....	66
3.2.5	Etapa 5: Acondicionamiento del software de procesamiento de señales de vibración y video. 67	
3.2.6	Etapa 6: Levantamiento de línea base de señales de vibración y video.....	72
3.2.7	Etapa 7: Adquisición de señales de vibración y video.....	76
3.2.8	Etapa 8: Base de datos adquiridas. ....	79
4	CAPÍTULO 4. – EVALUACIÓN DE RESULTADOS .....	82
4.1	Metodología para la evaluación de señales de vibración y video. ....	82
4.2	Proceso de evaluación de señales de vibración y video.....	83
4.2.1	Etapa 1: Ingreso señal de vibración y video .....	83
4.2.2	Etapa 2: Aplicación de la transformada rápida de Fourier. ....	83
4.2.3	Etapa 3: Comparación de las frecuencias características de las señales de vibración y video en el dominio de la frecuencia .....	83
4.2.4	Etapa 4: Evaluación comparativa de las frecuencias características de la señal de vibración y video en el dominio de la frecuencia.....	84
4.3	Evaluación de las señales de vibración y video de bombas centrífugas multietapa de eje vertical en el dominio de la frecuencia. ....	84
4.3.1	Condiciones normales. ....	85
4.3.2	Fallo de cavitación.....	88
4.3.3	Desbalanceo leve.....	91
4.3.4	Desbalanceo moderado. ....	94
4.3.5	Desbalanceo severo.....	97
4.4	Resumen de resultados. ....	100
5	DISCUSION .....	103
6	CONCLUSIONES .....	104
7	RECOMENDACIONES .....	104
8	TRABAJOS FUTUROS .....	104
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Proceso de adquisición de datos. ....	17
<b>Figura 2.</b> Proceso del MBC. ....	21
<b>Figura 3.</b> Proceso de la técnica de análisis de vibraciones. ....	25
<b>Figura 4.</b> Tipos de problemas encontrados en bombas. ....	26
<b>Figura 5.</b> Señal de vibración y sus términos. ....	28
<b>Figura 6.</b> Mapa conceptual señales de vibración. ....	29
<b>Figura 7.</b> Composición de la señal de vibración de acuerdo con las composiciones espectrales. ....	31
<b>Figura 8.</b> Ejemplo de una señal de vibración en el dominio del tiempo. ....	31
<b>Figura 9.</b> Dominio de tiempo vs. dominio de la frecuencia. ....	32
<b>Figura 10.</b> Carta de Charlotte para cavitación y desalineación en bombas centrífugas. ....	33
<b>Figura 11.</b> Principio de funcionamiento de una bomba centrífuga multietapa vertical. ....	34
<b>Figura 12.</b> Bomba centrífuga multietapa vertical. ....	35
<b>Figura 13.</b> Esquema bomba centrífuga multietapa de eje vertical. ....	36
<b>Figura 14.</b> Patrón de vibración bomba centrífuga multietapa modelo 3SV10GE4F520. ....	38
<b>Figura 15.</b> Etapas de implosión de una burbuja por cavitación. ....	39
<b>Figura 16.</b> Caída del 3 % NPSHr vs. HB. ....	40
<b>Figura 17.</b> Diagrama Ishikawa de varias causas que llevan a la cavitación en la entrada y salida de la bomba. ....	41
<b>Figura 18.</b> Síntomas de cavitación. ....	41
<b>Figura 19.</b> Erosión en impulsor a causa de la cavitación. ....	43
<b>Figura 20.</b> Diferencia entre centro de gravedad y centro geométrico. ....	44
<b>Figura 21.</b> Curva altura-caudal (a), Curva rendimiento-caudal (b). ....	47
<b>Figura 22.</b> Curva H-NPSHd. ....	48
<b>Figura 23.</b> Composición de un píxel y subpíxel en diferentes casos. ....	51
<b>Figura 24.</b> Puntos de interés dentro de video. ....	52
<b>Figura 25.</b> Espectro adquirido del procesamiento de señales de video. ....	54
<b>Figura 26.</b> Resumen del capítulo 2. ....	56
<b>Figura 27.</b> Banco de pruebas experimental para bomba centrífugas. ....	57
<b>Figura 28.</b> Sistema A Banco de pruebas experimental. ....	58
<b>Figura 29.</b> Sistema de iluminación del banco de pruebas experimental. ....	58
<b>Figura 30.</b> Sistema B de adquisición de datos del banco de pruebas experimental. ....	59
<b>Figura 31.</b> Proceso experimental para la adquisición de señales de vibración mediante acelerómetro y DragónVisión®. ....	60
<b>Figura 32.</b> Sistema de bombeo planta A-1. ....	62
<b>Figura 33.</b> Secuencia de la conexión real del sistema de adquisición de señales de vibración. ....	63
<b>Figura 34.</b> Ubicación acelerómetro triaxial. ....	64
<b>Figura 35.</b> Emplazamiento de cámara. ....	64
<b>Figura 36.</b> Interfaz gráfica del programa LabVIEW. ....	65
<b>Figura 37.</b> Script en Matlab para exportación de datos de vibración. ....	67
<b>Figura 38.</b> Secuencia de conexión del sistema de exportación de señales de video. ....	67
<b>Figura 39.</b> Acondicionamiento de software de procesamiento de señales de vibración. ....	68
<b>Figura 40.</b> Barra de herramientas software Matlab. ....	68
<b>Figura 41.</b> Resultado luego de procesar las señales de vibración. ....	68

<b>Figura 42.</b> Calibración del Software DragónVisión®.....	69
<b>Figura 43.</b> Interfaz de gráfica del programa para la adquisición de señales de video. ....	69
<b>Figura 44.</b> Carga de videos a analizar. ....	70
<b>Figura 45.</b> Selección del área de análisis mediante puntos fijos y móviles. ....	71
<b>Figura 46.</b> Calibración y procesamiento de la señal de video. ....	71
<b>Figura 47.</b> Gráficas espectros de señal de vibración en el dominio del tiempo. ....	72
<b>Figura 48.</b> Proceso por seguir para la validación de la línea base. ....	72
<b>Figura 49.</b> Señal de vibración por el acelerómetro A1.....	75
<b>Figura 50.</b> Señal de video en el dominio de la frecuencia procesada por el software DragónVisión®.....	75
<b>Figura 51.</b> Base de datos obtenida de la bomba centrífuga multietapa de eje vertical. ....	79
<b>Figura 52.</b> Nomenclatura de las bases de datos.....	79
<b>Figura 53.</b> Resumen capítulo 3. ....	81
<b>Figura 54.</b> Proceso de evaluación de señales de vibración y video. ....	82
<b>Figura 56.</b> Proceso de evaluación. ....	84
<b>Figura 57.</b> Resumen capítulo 4. ....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Algunas de las técnicas de monitoreo de condición y su aplicación en los diferentes tipos de maquinaria.....	22
<b>Tabla 2.</b> Actividades y tareas planificadas para el mantenimiento predictivo en bombas. ....	23
<b>Tabla 3.</b> Frecuencia y causas de daños en bombas. ....	26
<b>Tabla 4.</b> Partes principales de una bomba centrífuga multietapa vertical. ....	36
<b>Tabla 5.</b> Significado de los dígitos del modelo de la bomba 3SV10GE4F20.....	37
<b>Tabla 6.</b> Datos técnicos de bomba multietapa de eje vertical 3SV10GE4F20.....	37
<b>Tabla 7.</b> Frecuencias presentes en la señal de vibración. ....	38
<b>Tabla 8.</b> Fallos en bombas centrífugas.....	38
<b>Tabla 9.</b> Métodos de ingeniería para la detección de la cavitación. ....	43
<b>Tabla 10 .</b> Tipos de desbalanceo presentes en bombas. ....	45
<b>Tabla 11.</b> Modelos de balanceo. ....	46
<b>Tabla 12.</b> Severidad y combinaciones para simulación de fallo de desbalanceo.....	49
<b>Tabla 13.</b> Fallo propuesto por desbalanceo como resultado de la erosión por cavitación. ....	49
<b>Tabla 14.</b> Combinaciones para simulación de fallo de desbalanceo. ....	50
<b>Tabla 15.</b> Parámetros mínimos para la obtención de una buena calidad de video. ....	55
<b>Tabla 16.</b> Sistemas del banco de pruebas experimental. ....	57
<b>Tabla 17.</b> Condiciones ambientales requeridos para la operación del banco de pruebas.....	61
<b>Tabla 18.</b> Parámetros de operación de la bomba centrífuga 3SV10GE4F20.....	61
<b>Tabla 19.</b> Parámetros recomendados de distancia y luminosidad.....	64
<b>Tabla 20.</b> Descripción de la interfaz gráfica del software LabVIEW. ....	65
<b>Tabla 21.</b> Parámetros para la adquisición de señales de vibración en LabVIEW. ....	66
<b>Tabla 22.</b> Especificación de video para los de equipos a utilizar.....	66
<b>Tabla 23.</b> Descripción de botones del software DragónVisión®.....	70
<b>Tabla 24.</b> Frecuencias características bomba centrífuga multietapa vertical 3SV10GE4F20. ....	74

<b>Tabla 25.</b> Frecuencias características presentes en la señal de vibración adquirida por el acelerómetro A1. .....	76
<b>Tabla 26.</b> Adquisición de señales de vibración y video en condiciones normales.....	76
<b>Tabla 27.</b> Adquisición de señales de vibración y video con fallo de cavitación. ....	77
<b>Tabla 28.</b> Adquisición de señales de vibración y video con fallo de desbalanceo leve. ....	77
<b>Tabla 29.</b> Adquisición de señales de vibración y video con fallo de desbalanceo moderado. ....	78
<b>Tabla 30.</b> Adquisición de señales de vibración y video con fallo de desbalanceo moderado. ....	78
<b>Tabla 31.</b> Base de datos #1 de señales de vibración de bomba centrífuga multietapa de eje vertical. ....	80
<b>Tabla 32.</b> Base de datos #2 de señales de video de bomba centrífuga multietapa de eje vertical. ....	80
<b>Tabla 33.</b> Tabla ejemplo de comparación frecuencias características. ....	83
<b>Tabla 34.</b> Evaluación comparativa de las señales de vibración y video. ....	84
<b>Tabla 35.</b> Señales de vibración y video de bomba centrífuga multietapa en condiciones normales.....	85
<b>Tabla 36.</b> Frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga en condiciones normales. ....	86
<b>Tabla 37.</b> Evaluación comparativa de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga en condiciones normales. ....	87
<b>Tabla 38.</b> Señales de vibración y video de bomba centrífuga multietapa con fallo de cavitación. ....	88
<b>Tabla 39.</b> Frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de cavitación. ....	89
<b>Tabla 40.</b> Evaluación comparativa de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de cavitación. ....	90
<b>Tabla 41.</b> Señales de vibración y video de bomba centrífuga multietapa con fallo de desbalanceo leve. ..	91
<b>Tabla 42.</b> Frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo leve. ....	92
<b>Tabla 43.</b> Evaluación comparativa de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo leve.....	93
<b>Tabla 44.</b> Señales de vibración y video de bomba centrífuga multietapa con fallo de desbalanceo moderado.....	94
<b>Tabla 45.</b> Frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo moderado.....	95
<b>Tabla 46.</b> Evaluación comparativa de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo moderado. ....	96
<b>Tabla 47.</b> Señales de vibración y video de bomba centrífuga multietapa con fallo de desbalanceo severo. .....	97
<b>Tabla 48.</b> Frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo severo. ....	98
<b>Tabla 49.</b> Evaluación comparativa de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo severo. ....	99
<b>Tabla 50.</b> Resumen de resultados de las evaluaciones comparativas de las señales de vibración y video. .....	100

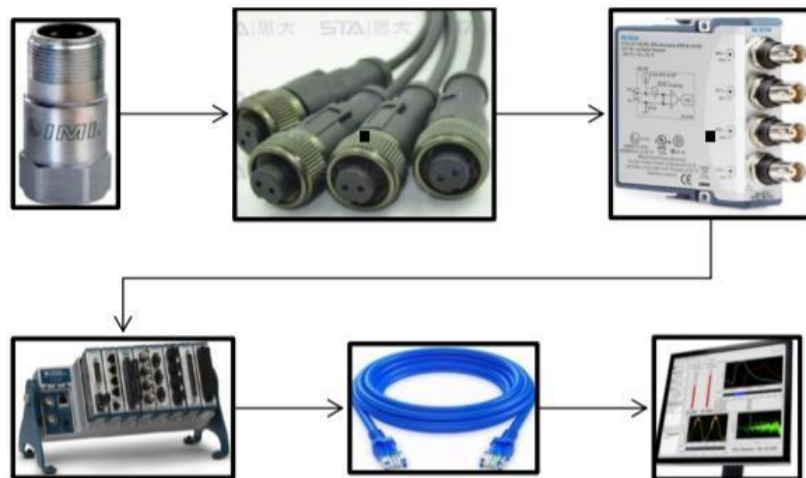


# 1 CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.

## 1.1 Planteamiento del problema.

### 1.1.1 Antecedentes

El Mantenimiento Basado en la Condición (MBC), es una estrategia que permite el uso de la información recopilada por el monitoreo de condición (MC) para determinar el estado de la máquina y recomendar medidas preventivas [1]. A nivel industrial, es conocido que al aplicarse el MC se reducen las paradas no programadas manteniendo operativa la maquinaria el mayor tiempo posible, evidenciando que el MBC presenta ventajas económicas en la mayoría de las industrias [2]. La técnica de análisis de vibraciones mediante un acelerómetro (Figura 1 [3]) es la más usada en industria para detección de fallos. Sin embargo, esta técnica es intrusiva al tener que emplazar un acelerómetro en la máquina a ser diagnosticada.



**Figura 1.** Proceso de adquisición de datos.

Una manera de realizar el análisis de un modo no intrusivo es mediante las señales de video, las mismas que son procesadas mediante un software que basa su funcionamiento en el rastreo de micro movimientos en grabaciones de video ordinarias a través de un complejo algoritmo, el cual analiza cada uno de los cuadros del video detectando pequeños cambios en el movimiento de puntos específicos

para convertirlos en señales de vibración. Este análisis se logra realizar mediante el software DragónVisión®, el cual dispone el grupo de investigación “GIDTEC” de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, donde también se cuenta con acceso a un laboratorio de vibraciones en el cual se ha realizado diversos estudios enfocados en maquinaria rotativa.

De todos los proyectos de titulación, tanto culminados como en desarrollo, realizados en GIDTEC, únicamente se ha realizado un trabajo de titulación para el grado de Ingeniero Mecánico, el mismo que estudia el tema de bombas y se titula “Adquisición de señales acústicas y vibracionales para el diagnóstico de fallos en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical” [3]; en el cual se emplean diferentes técnicas de MC como las emisiones acústicas y en el acelerómetro para detectar fallos. Hasta el momento, en ningún trabajo de titulación se ha empleado señales de video como sistema de adquisición de datos para el monitoreo y detección de fallos en bombas centrífugas multietapa de eje vertical.

### 1.1.2 Importancia y alcances

Diariamente se utilizan una gran variedad de máquinas que permiten satisfacer una necesidad puntual. Cuando una máquina falla, causa distintas molestias en el desarrollo de una actividad, además de un desbalance financiero, e incluso puede llegar a causar accidentes personales que se agraven en la pérdida de una vida. Es aquí donde el mantenimiento juega un rol muy importante en la industria, puesto que permite mejorar la disponibilidad, confiabilidad y seguridad de una máquina, mientras que reduce los costes de ciclo de vida [4]. El mantenimiento basado en la condición permite conocer el estado actual de la máquina a través de información recolectada en el monitoreo de la condición, pues, a nivel industrial el continuo monitoreo de la máquina logra reducir paradas no programadas y contribuye a aumentar la eficiencia en la línea de producción [5].

La bomba centrífuga es una máquina rotativa usada en varios campos industriales tales como: agricultura, bombeo de agua, industria alimenticia, industria química, entre otras. [6]. La presente investigación desarrolla una metodología en el mantenimiento basado en la condición para la evaluación

de técnicas de detección de fallos en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical a través de video y acelerómetros.

La Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, tiene a disposición el laboratorio de vibraciones con el cual se realizará el análisis de señales para el monitoreo de la condición; además, brinda los recursos necesarios para simular diferentes fallos que se pueden presentar en bombas centrífugas multietapa de eje vertical, aportando conocimientos en el mantenimiento basado en la condición, los cuales son aplicados en las industrias [5].

### 1.1.3 Delimitación

El banco de pruebas de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, permite simular fallos en bombas centrífugas multietapa de eje vertical, fallos por desbalanceo de eje, sello mecánico, impulsor y cavitación. El banco de pruebas planteado en esta investigación permite establecer una base de datos, útil para la investigación de mantenimiento basado en la condición en maquinaria industrial. El grupo de investigación y desarrollo en tecnologías industriales (GIDTEC) trabaja en este proyecto, que permitirá a la industria implantar un mantenimiento basado en la condición en bombas centrífugas multietapa de eje vertical de forma no invasiva mediante el análisis de señales de video a través del software DragónVisión®, el cual para este proyecto se tomará como referencia la distancia con el uso de un patrón.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

Evaluar las señales de video empleando la técnica espejo para la detección de fallos en bombas centrífugas multietapa de eje vertical.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la técnica espejo en el procesamiento de señales de video para la detección de fallos en bombas centrífugas multietapa de eje vertical.
- Establecer una metodología para detección de fallos en bombas centrífugas multietapa de eje vertical mediante la técnica espejo en el procesamiento de señales de video.
- Implementar y evaluar la metodología para la detección de fallos en bombas centrífugas multietapa de eje vertical mediante la técnica espejo en el procesamiento de las señales de video.

## 2 CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO.

### 2.1 Mantenimiento basado en la condición

El Mantenimiento Basado en la Condición (MBC), tiene como objetivo aumentar el tiempo funcional de la maquinaria, recomendando acciones de mantenimiento basadas en la información obtenida a través del monitoreo de condición, con la finalidad de aumentar la productividad, reducir los costos de mantenimiento y tiempos de inactividad. Se recomienda establecer un programa de mantenimiento basado en la condición en el cual se recopile la mayor cantidad de datos característicos de su funcionamiento con el fin de detectar fallos en maquinaria en sus primeras etapas. [7].

Las características del mantenimiento basado en la condición son [8]:

- Aviso previo del fallo inminente.
- Mayor precisión en la predicción de dicho fallo.
- Ayuda a facilitar un programa de diagnóstico, ya que se puede asociar el fallo de componentes específicos a través de los parámetros o atributos monitoreados.

Como se detalla en la Figura 2, para establecer un programa de mantenimiento basado en la condición se debe cumplir tres pasos; adquisición de datos, procesamiento de datos y toma de decisiones.

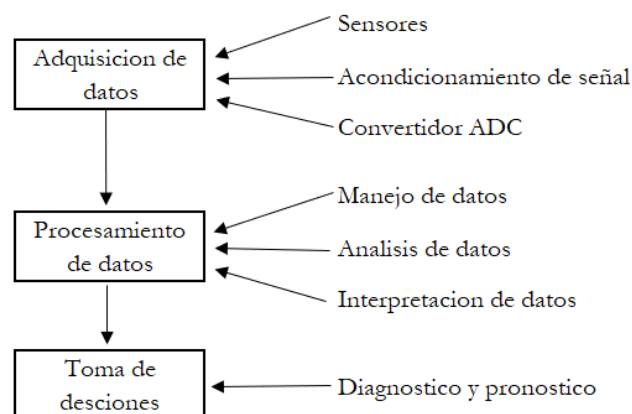


Figura 2. Proceso del MBC.

Luego de cumplir el proceso se estará en la capacidad de decidir las acciones de mantenimiento basadas en los resultados del diagnóstico y/o de pronóstico [8].

## 2.2 Monitoreo de la condición

El monitoreo de condición según ISO 17359:2018 [9] se define como la “Adquisición y procesamiento de información y datos que indican el estado de una máquina a lo largo del tiempo”. Su implementación se lleva a cabo mediante diversas técnicas de monitoreo de la condición (TMC). En la Tabla 1 [9], se presentan algunas técnicas de monitoreo de condición y su aplicación a distintas máquinas, sin embargo, se estudiará a detalle la técnica de análisis de vibraciones puesto que es una de las más usadas en la industria.

La selección y aplicación de la técnica adecuada para identificar fallos en la maquinaria debe ser realizada cuidadosamente; para ello se recomienda aplicar las recomendaciones propuestas en la norma ISO 17359:2018.

En términos generales, las técnicas en el monitoreo de condición son efectivas siempre y cuando se use la adecuada, caso contrario se generará grandes gastos representados en pérdida de tiempo, mano de obra, materia prima y repuestos.

**Tabla 1.** Algunas de las técnicas de monitoreo de condición y su aplicación en los diferentes tipos de maquinaria.

<b>Parámetro</b>	<b>Motor Eléctrico</b>	<b>Bomba</b>	<b>Compresor</b>	<b>Ventilador</b>
Vibraciones	*	*	*	*
Ultrasonido	*	*	*	*
Temperatura	*	*	*	*
Corriente	*			
Presión		*	*	*

Cuando un fallo está empezando, los niveles de vibración y el espectro de una bomba centrífuga por lo general son afectados o se puede encontrar discrepancias. Por lo tanto, la firma de vibración o el espectro de una máquina rotativa podría ser usada para identificar deficiencias en el equipo. En la actualidad el sensor más confiable es el acelerómetro gracias a su extenso rango de frecuencia, su instalación no es compleja y son confiables para medir señales de vibración. Las señales de vibraciones

tienen la posibilidad de ser procesadas de diversas formas para examinar diferentes tipos de información. Las técnicas más utilizadas en este campo son el estudio de señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia [10]. Por tanto, la señal de vibración obtenida de una bomba va a estar compuesta de diversas vibraciones correspondientes a todas las partes o elementos de esta [11], [12], [13]. Las medidas adquiridas en intervalos de tiempo determinados permitirán hacer un seguimiento del estado de salud de la maquinaria y detectar el fallo en su etapa inicial [14]. A partir de ahí y extrapolando del histórico, se pronosticará el tiempo que falta para que se llegue a la falla [6].

### 2.3 Mantenimiento en bombas

En el mantenimiento en bombas centrífugas es necesario la aplicación de TMC, la cual tiene una planificación y programación mediante actividades y tareas diarias, mensuales, trimestrales, semestrales y anuales resumidas en la Tabla 2 [15].

La técnica de análisis de vibraciones tiene una gran importancia dentro del mantenimiento en bombas, permite conocer el estado de condición de la maquinaria a tal punto que se realizan análisis diarios y mensuales los cuales son más exhaustivos, de esta manera se puede encontrar los fallos en su etapa inicial con lo cual el ciclo de vida de la bomba es mayor.

**Tabla 2.** Actividades y tareas planificadas para el mantenimiento predictivo en bombas.

Tiempo	Tareas
Diarias	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitorear las temperaturas de los cojinetes, el nivel de lubricante.</li> <li>• Los sellos mecánicos no deberían mostrar signos de fugas visibles. Algunas fugas son normales, pero no debe exceder <math>\approx 40-60</math> gotas por minuto.</li> <li>• Verificar la presencia de vibración excesiva ya puede ser el resultado de un cambio en la alineación de la bomba o resonancias de cavitación.</li> <li>• Monitorear los cambios en el nivel de presión, debido a que una disminución gradual en la presión de cabeza puede indicar que la holgura del impulsor se ha ampliado.</li> </ul>
Mensualmente:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar el aceite en los depósitos de cojinetes y el estado de los soportes</li> <li>• En el caso de que los niveles de vibración aumentaron realizar un análisis de vibraciones completo para encontrar fallas en su etapa inicial.</li> </ul>
Trimestral:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar la integridad de la base de la bomba y verificar los pernos de sujeción.</li> <li>• Las bombas lubricadas con aceite, cambiar el aceite después de las primeras 200 horas de funcionamiento para una bomba nueva, y luego cada tres meses o 2.000 horas de funcionamiento.</li> <li>• Engrasar los cojinetes de acuerdo con las instrucciones del fabricante.</li> </ul>
Semestralmente	Aplicar una capa ligera de antioxidante en las superficies maquinadas para evitar la oxidación y corrosión.
Anualmente	Verificar y registrar el rendimiento de la bomba en detalle. Se deben establecer una línea base con puntos de referencia de rendimiento para una bomba nueva durante las primeras etapas de la operación de una bomba.

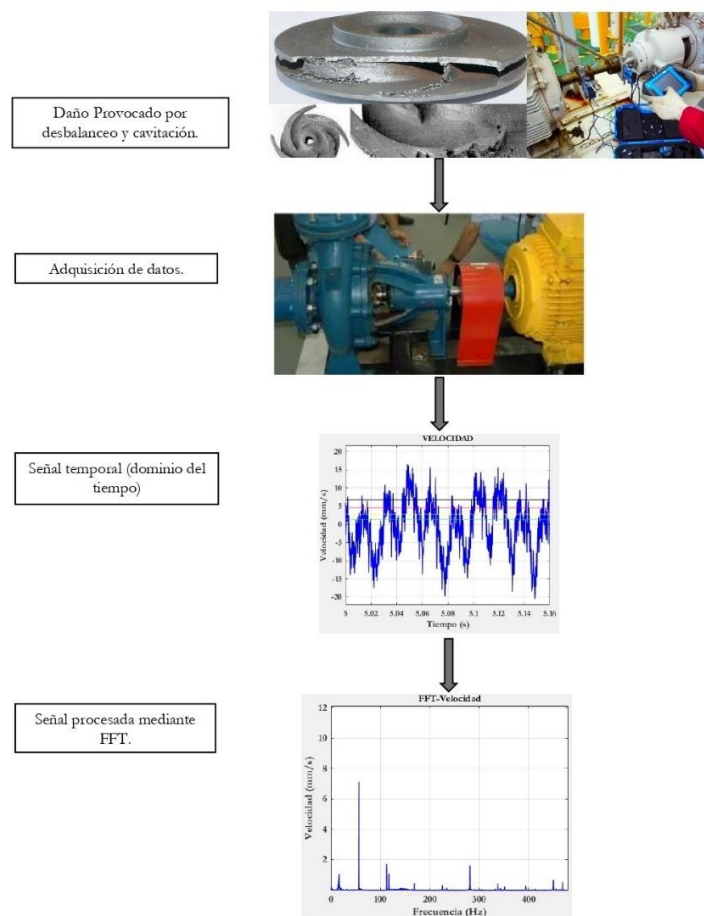
## 2.4 Técnica de monitoreo de la condición: Análisis de vibraciones.

La técnica de análisis de vibraciones estudia la evolución de las vibraciones en función del tiempo. Se puede afirmar que el mantenimiento predictivo por vibraciones mecánicas, a través de la medición continua o periódica, el análisis y control de determinados factores conforman los indicadores del estado de salud o condición de la máquina y que indica que va a existir un fallo, su ubicación, gravedad y el tiempo en que el equipo puede fallar. El hecho de que la condición de la máquina esté profundamente ligada con las vibraciones que produce, hace que la medición, el análisis de vibraciones, el análisis de señales y el análisis mecánico sean las herramientas básicas del mantenimiento predictivo por vibraciones mecánicas [16].

La toma de decisiones a tiempo permite evitar que el fallo se presente (proactivo) o descartar la posibilidad de un fallo catastrófico (predictivo). La ventaja de esta estrategia es que se realiza mientras el equipo está en funcionamiento [17].

Como se observa en la Figura 3, el análisis de vibraciones consiste en captar la vibración originada en la máquina mediante un sensor, obteniendo una señal temporal la cual abarca todas las vibraciones de la máquina (eje, rodamiento, alabes), luego empleando la FFT se procesa la señal temporal filtrando las frecuencias características de cada elemento.



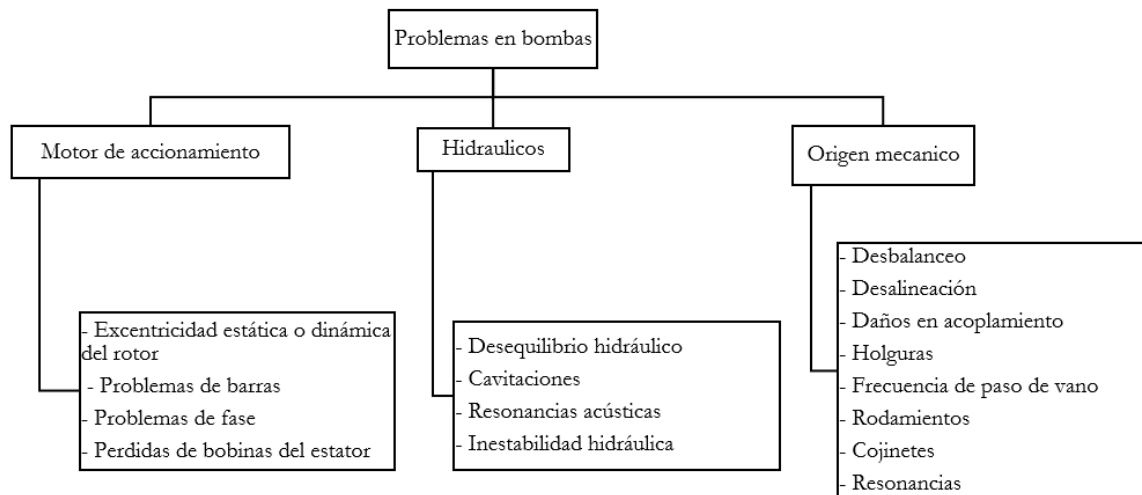


**Figura 3.** Proceso de la técnica de análisis de vibraciones.

Las señales obtenidas se pueden procesar en el dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier (FFT), y en el se puede identificar las frecuencias características con las cuales se puede asociar cada frecuencia con su fuente de vibración, este tema se estudiará más a detalle en la sección 2.5.4.

El análisis espectral permite encontrar problemas y defectos por los cuales se genera vibración en bombas centrífugas. Frecuentemente en las bombas centrífugas no es complicado su análisis, puesto que constan del motor eléctrico, el acoplamiento y el cuerpo de la bomba siendo el accionamiento comúnmente directo sin transmisiones de engranajes o de correas [18].

Es importante antes de empezar a realizar un análisis de vibraciones reconocer que tipo de problemas se encuentran en las bombas, los cuales se detallan en la Figura 4 [18].



**Figura 4.** Tipos de problemas encontrados en bombas.

Generalmente cada uno de los problemas mencionados produce una vibración a una frecuencia que se puede relacionar con la frecuencia de giro de la máquina o frecuencia fundamental y que se denomina como “1x”, así una vibración producida a una frecuencia doble de la principal estará en el “2x” a esto se le conoce como frecuencia en orden de X [18].

La Tabla 3 muestra causas de fallo en bombas y el rango de frecuencias en los que se originan y localizan.

**Tabla 3.** Frecuencia y causas de daños en bombas.

Frecuencia en Hz	Causa
0 a 10 Hz	Recirculación en la bomba, holgura inadecuada entre los álabes y el cuerpo de la bomba, desplazamiento axial del rotor.
3 a 15 Hz	Vibración en las conducciones excitadas por pulsos de presión.
0.05x/0.25x	Problemas de flujo.
0,4x a 0,5x	Inestabilidad dinámica en los cojinetes. Remolino de aceite (oil whirl) y latigazo de aceite (oil whip).
0,7x/0,85x	Inestabilidad hidráulica originada por un mal diseño en la geometría de la impulsión de la bomba. A veces la frecuencia natural del rotor se encuentra en este rango pudiendo originar resonancia
1x	Muchos defectos pueden estar asociados a esta frecuencia, siendo el más común el desbalanceo mecánico o hidráulico.
2x,3x,4x...	Holguras.
Zx (siendo Z el número de álabes del impulsor)	Frecuencia de paso de álabes, es inherente a la vibración en bombas, su incremento y aparición de armónicos de esta puede indicar rotura u obstrucción de un álabe o también su excentricidad.
5x a 20x	Frecuencias de rodamientos.
6x a 12x	Frecuencias originadas por los variadores de frecuencia.
Frecuencias no relacionadas con el 1x	Posibles resonancias originadas por la vibración en máquinas adyacentes.
100 Hz	Excentricidad rotoestática.

## 2.5 Vibración

### 2.5.1 Señal de vibración.

Una señal de vibración se define como toda la información de magnitud física variable que se convierte en magnitud eléctrica; esta información es extraída mediante la oscilación o el desplazamiento cíclico de cualquier objeto cerca de una posición considerada como posición de equilibrio con el uso de un transductor [11].

La posición de equilibrio es a la cual se llegará cuando la fuerza que actúa sobre el sea cero, o el elemento entre en reposo. Esta clase de vibración se denomina vibración de cuerpo completo, es decir, que cada una de las partes o elementos se mueven juntos en la misma dirección en cualquier instante.

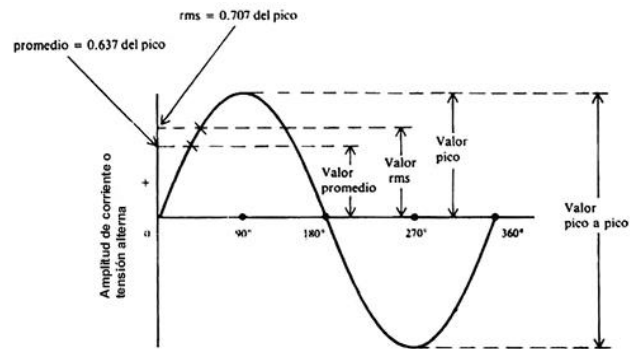
En otra definición de vibración, se entiende como un intercambio de energía cinética en cuerpos con rigidez y masa finitas, el cual se produce de una entrada de energía dependiente del tiempo. Este intercambio de energía podría ser producido por [17]:

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

La amplitud desde el punto de vista de las vibraciones es la cantidad de movimiento o la energía de vibración en la máquina. A mayor energía de la vibración, mayor velocidad de amplitud de raíz puede tener una masa desde una posición neutral y se mide generalmente en valores pico-pico (Pk-Pk), este valor es la distancia de una cresta negativa hasta una cresta positiva, en el caso de una onda senoidal. El valor pico a pico es exactamente dos veces el valor pico, debido a que la forma de la onda es simétrica. Y los valores cero-pico y RMS para velocidad y aceleración, en el caso de una onda senoidal el valor RMS es igual a 0.707 del valor pico y el valor promedio es 0.637 del valor pico [19], [20].

En la Figura 5, se muestran los términos empleados en la señal de vibración, como son:

- $T$  = período de forma de onda, el tiempo (en segundos) necesario para que se produzca un ciclo de vibración.
- $F$  = frecuencia de vibración =  $1/T$  el número de ciclos completos de vibración que se producen en un segundo.



**Figura 5.** Señal de vibración y sus términos.

En la Figura 6, se presenta un mapa conceptual que ilustra las señales de vibración y sus características más importantes.

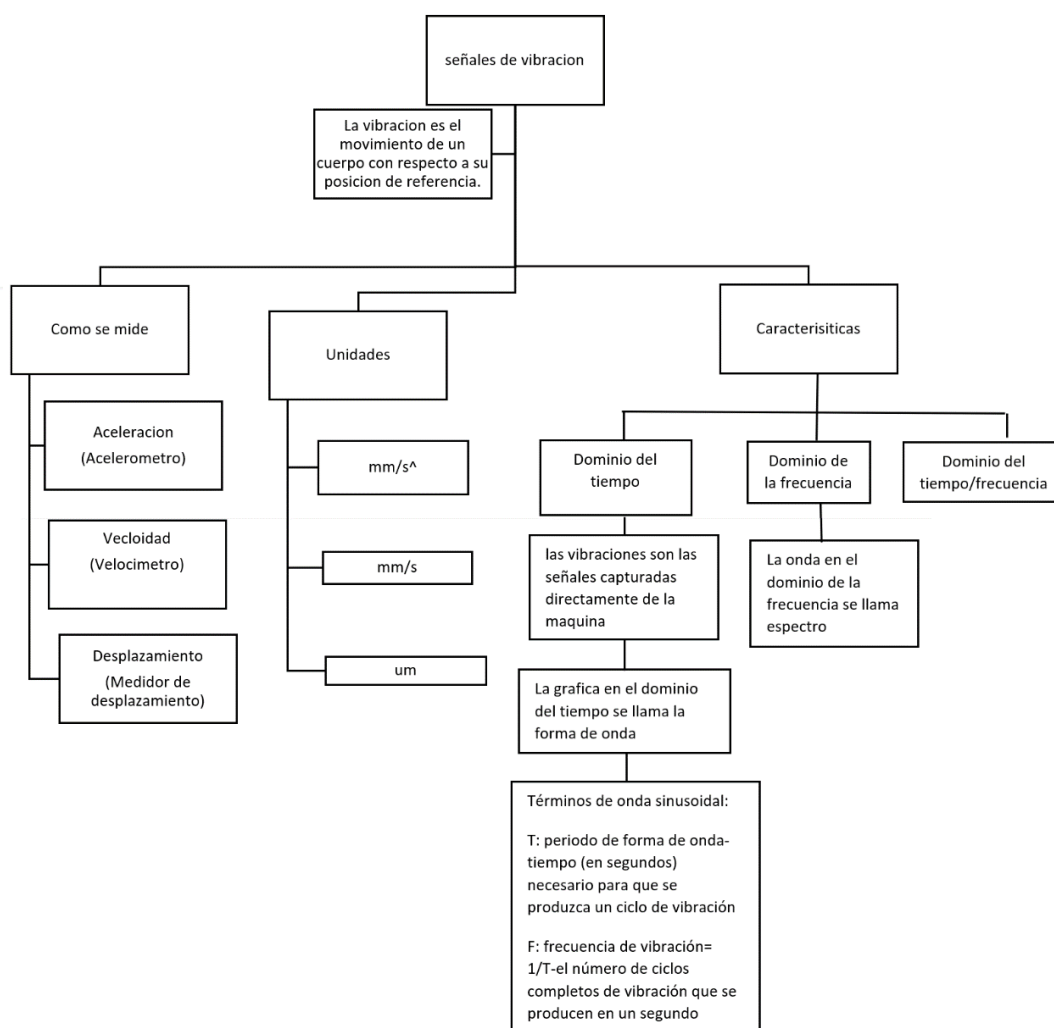


Figura 6. Mapa conceptual señales de vibración.

### 2.5.2 Ventajas y limitaciones del monitoreo de las señales de vibración.

Para realizar un correcto análisis de vibración se debe conocer previamente las siguientes ventajas y limitaciones que respectan al monitoreo de las señales de vibración [21], [22].

#### Ventajas:

- Detección temprana e identificación de fallos sin necesidad de parar ni desmontar la máquina, debido a que los sensores de vibración (acelerómetros) por lo general son de fácil instalación.

- Seguir la evolución del defecto en el transcurso del tiempo hasta que este se convierta en un peligro, por lo tanto, se puede realizar una programación del suministro del repuesto y la mano de obra para proceder con la reparación con suficiente tiempo.
- Programación de la parada para corrección del fallo, dentro de un tiempo muerto o parada rutinaria del proceso productivo.
- Reducción del tiempo de reparación, ya que se tienen perfectamente identificados los elementos desgastados, averiados, posibles a fallar.
- Permite una selección satisfactoria de las condiciones de operación de la máquina.
- Funcionamiento más seguro de la máquina y toma de decisiones más rápida.

**Limitaciones:**

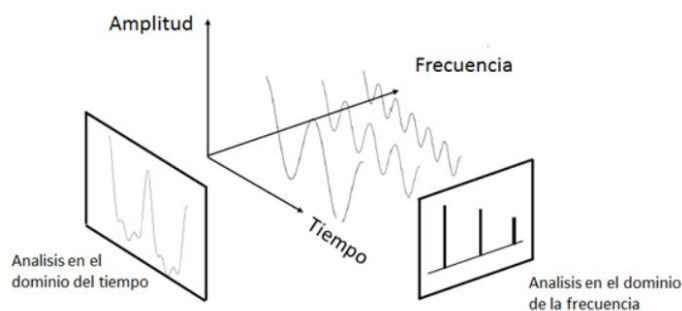
- Cualquier vibración de fondo intrusiva puede contaminar la señal y dificultar o generar un diagnóstico erróneo.
- Investigación del equipamiento a monitorear como son: límites de vibración, determinación de espectros patrones, selección de puntos de medición.
- Selección y adquisición de la instrumentación.
- Formación o contratación de personal encargado de las mediciones de rutina.
- Especialización del personal operador y de ingeniería encargado de procesar las señales y de la toma de decisiones.

### 2.5.3 Señales de vibración en el dominio del tiempo.

Las señales de vibraciones en el dominio del tiempo son señales obtenidas directamente de la máquina, las cuales son ondas sinusoidales. Estas son las más simples y son la representación de las oscilaciones puras [19].

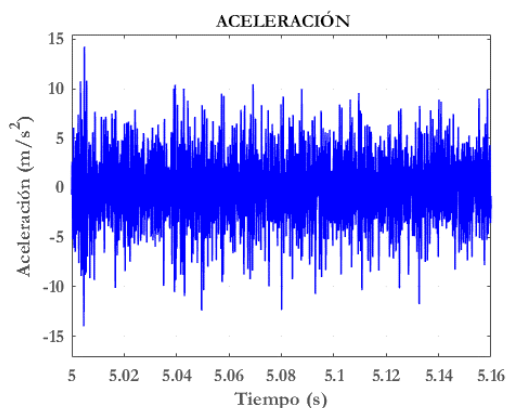
El análisis del dominio del tiempo es sencillamente el uso de la gráfica en el dominio del tiempo llamada forma de onda tal como se observa en la Figura 7, para ayudar a diagnosticar problemas de máquinas,

los espectros de un impulso o de un transitorio y de una señal aleatoria pueden parecer exactamente iguales. Esto es válido, aunque las señales sean muy diferentes en sus características. La forma de onda enseña la diferencia inmediatamente, y por eso es importante que el analista examine la forma de onda [20].



**Figura 7.** Composición de la señal de vibración de acuerdo con las composiciones espectrales.

La Figura 8, presenta un ejemplo de una señal de vibración típica de dominio del tiempo de una bomba centrífuga multietapa de eje vertical [19].



**Figura 8.** Ejemplo de una señal de vibración en el dominio del tiempo.

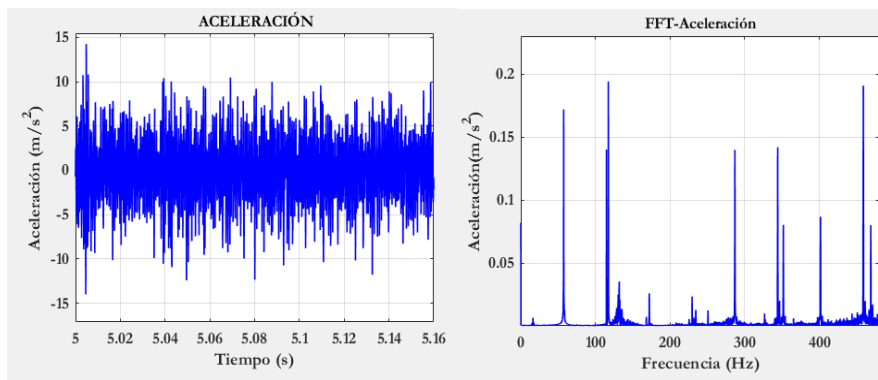
La señal de vibración en el dominio del tiempo cuenta con la información acerca del comportamiento de cada componente de la máquina. Pero hay un problema a la hora de realizar un diagnóstico: estas señales están cargadas de mucha información en forma muy compleja, la cual comprende las señales características de cada componente de la máquina, por lo cual prácticamente queda imposible distinguir a simple vista sus comportamientos característicos.

## 2.5.4 Señales de vibración en el dominio de la frecuencia.

Comúnmente se lleva a cabo un análisis de frecuencias, también llamado análisis de señal de espectro de la señal de vibración. El análisis del espectro es equivalente al transformar la información de la señal del dominio de tiempo en dominio de la frecuencia.

El análisis en el dominio de la frecuencia es el más común para el diagnóstico de fallos, es usado en el mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones basados en encontrar la relación existente, entre la frecuencia característica presente en el espectro y las fuerzas dinámicas que generan las vibraciones. En el dominio de la frecuencia es posible observar la influencia de cada fallo, como componente individual ligado a una amplitud, pero esta representación es susceptible a los cambios de velocidad.

En la Figura 9, se observa el análisis de los picos en el dominio de la frecuencia, esta muestra diferentes componentes los cuales son separados y sus niveles son fácilmente identificados. Este análisis indica los picos en el espectro permitiendo detectar fallos que tienen una respuesta y un comportamiento según su fuente de excitación, además que es posible percibir el comportamiento del fallo en el tiempo, el análisis espectral es por excelencia utilizado para detectar fallos, pero en ocasiones por el grado de complejidad es difícil identificarlos debido al gran número de elementos implicados [20].



**Figura 9.** Dominio de tiempo vs. dominio de la frecuencia.



## 2.6 Patrones de fallos de vibraciones en bombas centrífugas

El análisis de frecuencias se basa en resultados experimentales compilados en las cartas de diagnóstico ilustradas de vibración de la Asociación de Técnicos de Charlotte (Figura 10), las cuales permiten realizar una comparación visual de los problemas que pueden presentarse en un equipo, determinar la severidad y su evolución, y al final tomar decisiones pertinentes en el momento de la intervención, cabe recalcar que dichas cartas no comprenden la totalidad de los casos, ni son el reflejo exacto de los encontrados en la realidad. Estas cartas son bases importantes para cualquier analista de vibraciones quien deberá recurrir a su experiencia y a un análisis crítico para generar diagnósticos.

Tomando en cuenta todos los fallos que expone la carta de Charlotte se hará un enfoque en el estudio de dos fallos: desbalanceo y cavitación [23].

Fallo	Espectro típico	Descripción
Paso de alabes (BPF)		Frecuencia de Paso de Alabes (BPF por sus siglas en inglés) = Núm. de Alabes (o Aspas) X RPM. Esta frecuencia es inherente en bombas, ventiladores y compresores y por lo general no presenta problemas. Algunas veces coincide con una frecuencia natural del sistema causando alta vibración.
Cavitación		La cavitación normalmente genera una energía de banda ancha de frecuencia más alta y aleatoria que algunas veces se superpone con las armónicas de frecuencia de paso de alabes. Por lo general, indica presión insuficiente de succión. La cavitación puede ser destructiva en la parte interna de la bomba si no se corrige. Cuando está presente, con frecuencia se oye como si pasara “arena” a través de la bomba.
Desequilibrio dinámico		Es el más común y es una combinación de desequilibrio de estático y de par. 1X RPM domina el espectro, y realmente requiere una corrección de 2 planos. Aquí, la diferencia de fase radial entre los apoyos internos y externos puede abarcar un rango de 0° a 180°. Sin embargo, la diferencia en fase de los apoyos horizontales será similar a la diferencia entre las fases verticales ( $\pm 30^\circ$ ).

Figura 10. Carta de Charlotte para cavitación y desalineación en bombas centrífugas.

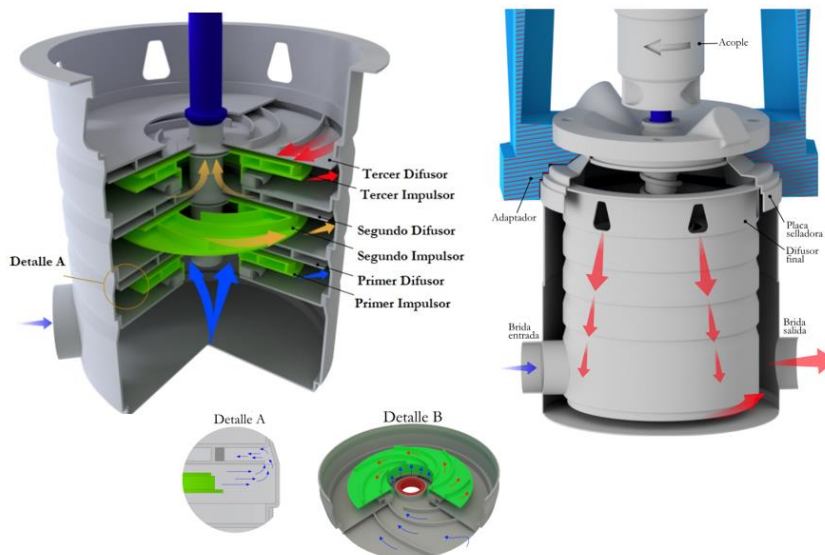
## 2.7 Bomba centrífuga.

### 2.7.1 Bomba hidráulica.

Bomba hidráulica es una máquina hidráulica que permite bombear un fluido líquido lo que se refiere a su transporte de un punto a otro, por lo general de un lugar más bajo a uno más alto, venciendo presiones y desniveles[24].

### 2.7.2 Funcionamiento de una bomba centrífuga.

La bomba centrífuga es la máquina rotativa más común y por ende la más utilizada en la industria, consta de una rueda con álabes mejor conocida como impulsor o rodete, la cual gira alrededor del eje cuando pasa un fluido por su interior. En el rodete tiene lugar una transformación de energía mecánica a energía del flujo. Este tipo de máquinas se conocen como turbomáquinas consumidoras de energía mecánica como ejemplo bombas hidráulicas, ventiladores y turbocompresores [25]. La Figura 11, presenta el funcionamiento de una bomba centrífuga multietapa de eje vertical [3].



**Figura 11.** Principio de funcionamiento de una bomba centrífuga multietapa vertical.

### 2.7.3 Clasificación general de las bombas.

La clasificación de bombas se divide en dos familias primordiales: bombas de energía cinética, que se subdividen en periféricas (unípasso, multipaso, electromagnéticas), especiales (electromagnéticas) y centrífugas (flujo axial, flujo radial y flujo mixto), y bombas de movimiento positivo que se subdividen en reciprocantes (pistón, émbolo, diafragma) y rotatorias (rotor simple, rotor). Estas dos familias se dividen en equipos más pequeños para servicios específicos. Las dos familias de bombas agregan energía al líquido, para moverlo por medio de una tubería de un espacio a otro. En esta categorización se consideró para el presente trabajo una bomba multietapa de eje vertical, correspondiente al conjunto de bombas centrífugas de flujo axial por el sentido de desplazamiento del flujo [3].

### 2.7.4 Bombas centrífugas multietapa de eje vertical.

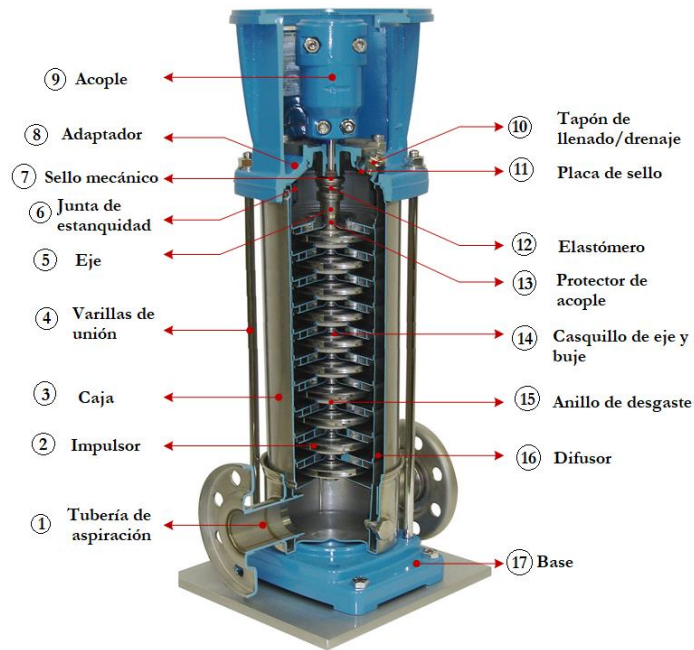
Una bomba centrífuga multietapa de eje vertical, es aquella con distribución de flujo axial cuyos elementos principales consisten en una base y un cabezal de bomba. En su interior se alojan una serie de impulsores los cuales, con la ayuda de un motor, mueven al líquido por etapas con el objetivo de obtener mayor cabeza de carga y de esta manera elevar el fluido a mayores alturas [26]. La Figura 12, muestra una bomba centrífuga multietapa de eje vertical, esta clase de máquina hidráulica se utilizará en el presente trabajo para la adquisición de señales de video y de vibración [3].



**Figura 12.** Bomba centrífuga multietapa vertical.

## 2.7.5 Caracterización de la bomba centrífuga multietapa vertical modelo 3SV10GE4F20

La Figura 13, ilustra un corte en  $\frac{3}{4}$  de una bomba centrífuga multietapa vertical 3SV10GE4F20 ITT-GOULDS PUMPS para la línea e-SV, donde se muestran las partes primordiales las cuales se enlistan en la Tabla 4 [3].



**Figura 13.** Esquema bomba centrífuga multietapa de eje vertical.

**Tabla 4.** Partes principales de una bomba centrífuga multietapa vertical.

Número	Descripción	Material
1	Tubería de succión	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/ Vitón
8	Adaptador	Acero inoxidable
9	Acople	Hierro Fundido
10	Tapón de llenado/drenaje	Acero inoxidable
11	Placa de sello	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

La línea e-SV son las versiones de bombas centrífugas multietapa de eje vertical fabricadas con materiales inoxidables, se encuentran identificadas por un código alfanumérico de producto en la etiqueta de la bomba. Este número es además el del catálogo de la bomba y la definición de cada dígito en el código del producto se muestra en la Tabla 5 [3].

**Tabla 5.** Significado de los dígitos del modelo de la bomba 3SV10GE4F20.

<b>Modelo → 3 SV 10 G E 4 F 2 0</b>	
3	Flujo normal → 16 GPM
SV	Stainless Vertical → Inoxidable Vertical
10	Etapas o número de impulsores → 10
G	Opción de configuración → CI-304
E	Potencia del motor [HP] → 2 HP
4	Polos - Hz - Fases → 4 (2 Polos – 60 Hz – 3 Fases)
F	Voltaje → F (208-230 / 460 V)
2	Recinto del motor → 2 (TEFC)
0	Material del sello → 0 (carb-silcar-viton)

La Tabla 6, presenta los principales datos técnicos de la bomba centrífuga multietapa vertical modelo 3SV10GE4F20, esta bomba es la que será utilizada para los diferentes experimentos de la presente investigación [3].

**Tabla 6.** Datos técnicos de bomba multietapa de eje vertical 3SV10GE4F20.

<b>Datos técnicos de la bomba multietapa de eje vertical 3SV10GE4F20</b>	
Modelo	3SV10GE4F20
Tipo	Centrífuga de flujo axial – eje vertical
Potencia	2 HP (1.5 KW)
Alimentación del motor	Trifásica 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 GMP
Máxima cabeza	1085 ft
Máxima presión de trabajo	580 PSIG
Presión en la descarga	10.7 Bar
Rango de temperatura	-20 °F → 250 °F; -20 °C → 121 °C
Eficiencia máxima de la bomba	60 %

## 2.7.6 Patrón de vibración de bomba centrífuga multietapa vertical 3SV10GE4F20.

En la Figura 14, se observa la señal de una bomba centrífuga multietapa vertical 3SV10GE4F20, en la cual se encuentran identificadas las frecuencias que se detallan en la Tabla 7.

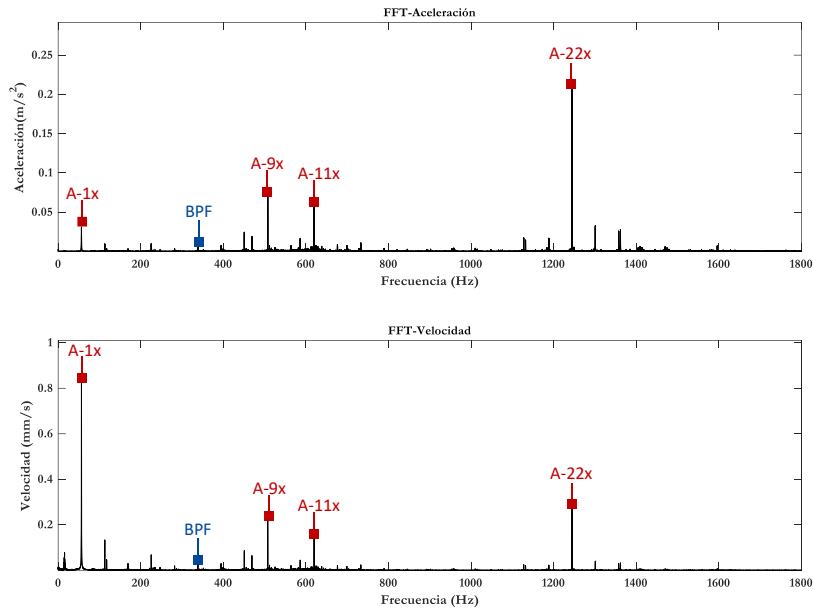


Figura 14. Patrón de vibración bomba centrífuga multietapa modelo 3SV10GE4F520.

Tabla 7. Frecuencias presentes en la señal de vibración.

Punto	Frecuencia [Hz]	Amplitud [m/s <sup>2</sup> ]	Amplitud [mm/s]	Denominación	Formula
A-1x	56.4	0.02612	0.8601	Giro del Motor	$A-1x = \frac{Velocidad}{60}$
BPF	338.2	0.007815	0.03667	Paso de alabes	$BPF = \frac{Rpm_{motor} * Na}{60}$
A-9x	507.3	0.07099	0.223	3X de giro de motor	$A-9x = (n-1) * (A1-1x)$
A-11x	620	0.0593	0.1523	Frecuencia de número de etapas	$A-11x = (n+1) * (A1-1x)$
A-22x	1244	0.2118	0.2712	2X de frecuencia de etapas	$A-22x = (n+1) * 2 * (A1-1x)$

### 2.7.7 Fallos en bombas centrífugas.

En la Tabla 8, se muestran los fallos más comunes en bombas centrífugas multietapa [27].

Tabla 8. Fallos en bombas centrífugas.

No.	Fallos	Frecuencia	%	% acumulado
1	Daños en elementos que conforman la junta entre cascos y cabezotes	36	63.16	63.16
2	Desbalance	5	8.77	71.93
3	Formación de fluoruro en partes internas de la bomba	4	7.02	78.95
4	Fuga de producto por sello mecánico	4	7.01	85.96
5	Partes desprendidas dentro de la bomba (impulsor y aro)	3	5.27	91.23
6	Desalineación	3	5.26	96.49
7	Rodamientos dañados	1	1.76	98.25
8	Holgura excesiva	1	1.75	100
<b>Total</b>		<b>57</b>		

## 2.8 Cavitación en bombas centrífugas multietapa de eje vertical.

### 2.8.1 Cavitación y sus tipos.

La cavitación es una condición anormal en los sistemas de bombeo [28]; se considera como el problema más común que ocurre en el lado de succión de las bombas centrífugas. La cavitación se presenta cuando la presión de succión de la bomba cae por debajo de la presión de vapor del fluido. Durante la condición de cavitación, la burbuja de vapor surge en el fluido en desplazamiento donde la presión del fluido es menor que su presión de vapor [8]. La formación de burbujas de vapor puede tener efectos perjudiciales en cualquier sistema de bombeo incluso el colapso catastrófico de la bomba en poco tiempo debido a la erosión en la carcasa y todos sus elementos. Para conocer más a detalle este fenómeno la Figura 15 ilustra las etapas de implosión de una burbuja a partir de su formación hasta su colapso final con la estructura [29].

El problema se ve agravado debido a que el impulsor está encerrado, en la mayoría de los casos, el primer síntoma importante de cavitación es la aparición de ruidos y vibraciones severas [35].

Los diferentes tipos de cavitación son: cavitación incipiente, cavitación de vórtice, cavitación viajera y cavitación vibratoria [29].



**Figura 15.** Etapas de implosión de una burbuja por cavitación.

### 2.8.1.1 Cavitación incipiente.

Es considerada la 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. En la mayoría de los casos, se requiere un aumento de la presión por encima de la cual aparece la cavitación.

Para realizar estudios de vibración, se determina su presencia con la caída del 3 % de presión de la cabeza de la bomba con respecto a su presión en condiciones normales según la norma ANSI/HI 1.6 centrífugal pump test(M104) 1994 Edition [30], [31]; se utiliza la carga neta de succión positiva requerida y disponible (NPSHr y NPSHd) y la altura de la bomba ( $H_B$ ) cómo se observa en la Figura 16.

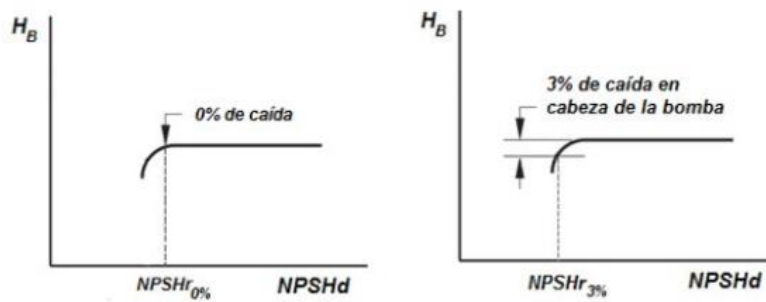


Figura 16. Caída del 3 % NPSHr vs. HB.

### 2.8.2 Análisis causa-raíz para cavitación

Si la presión del líquido ( $P$ ) se reduce a la presión de vapor ( $P_v$ ) del mismo, el líquido se evapora. Entonces el estado de cavitación ocurre cuando las burbujas regresan al estado líquido en áreas donde la presión es mayor a la presión de vapor ( $P > P_v$ ), la burbuja tiene un ciclo de vida corto (milisegundos). El estado de cavitación puede ocurrir en la entrada y/o descarga [32] [33] [34].

Los diferentes motivos llevan al estado de cavitación, en la Figura 17, se muestra varias causas que originan cavitación [32], [35], [36], [37].



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) o bloqueo en la tubería de descarga inducen cavitación [36], [37].

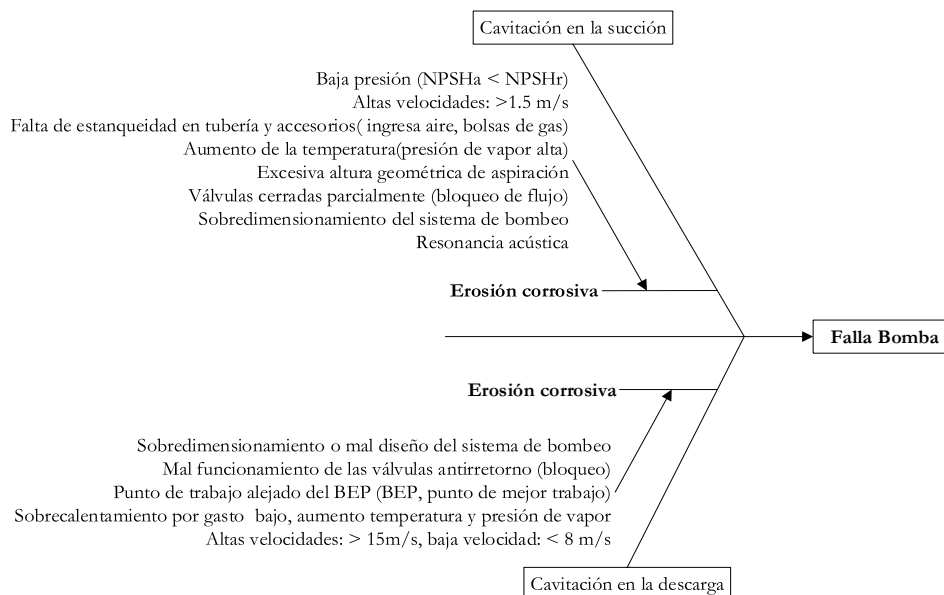


Figura 17. Diagrama Ishikawa de varias causas que llevan a la cavitación en la entrada y salida de la bomba.

### 2.8.3 Síntomas de cavitación.

En la Figura 18, se muestran varios de los síntomas que se presentan y que afectan adversamente el rendimiento de la bomba, en casos severos pueden dañar partes de ella. Estos síntomas son muy importantes en el monitoreo de la condición [38].

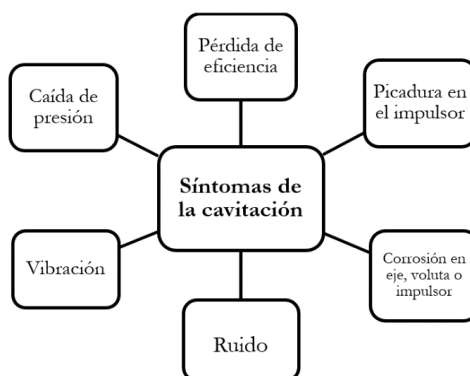


Figura 18. Síntomas de cavitación.

## 2.8.4 Efectos que produce la cavitación.

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

### 2.8.4.1 Disminución del rendimiento de la bomba.

En una bomba centrífuga el impulsor genera toda la carga, el resto de las partes no ayudan a aumentarla, sino que producen pérdidas inevitables, tanto hidráulicas como mecánicas. 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 lo que provoca una disminución del caudal y la altura manométrica [39].

En su recorrido las burbujas de vapor dañan los conductos de paso del líquido en el tubo de succión 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 manera que el volumen de las burbujas pasa a ser ocupado por el líquido de forma violenta que se acompaña de ruidos y vibraciones, esto compromete en un golpeteo sobre los álabes, que se transmite al eje, cojinetes, cierres mecánicos y demás componentes. Por lo tanto, disminución del rendimiento de la bomba perdiendo así sus características óptimas para el funcionamiento, si la bomba funciona en estas condiciones durante cierto tiempo puede reducir considerablemente su vida útil [40].

### 2.8.4.2 Erosión de los componentes de la bomba.

El deterioro de elementos por cavitación es una fusión 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 por lo general tiene un aspecto semejante a picaduras por corrosión como se observa en la Figura 19, pero las zonas dañadas son más compactas y la superficie es más irregular en el caso de la cavitación [39].



**Figura 19.** Erosión en impulsor a causa de la cavitación.

#### 2.8.5 Monitoreo adecuado para la cavitación en bombas centrífugas.

Se han realizado un gran número investigaciones con el objetivo de detectar la cavitación en bombas centrífugas, hay dos formas diferentes de detectar el inicio de la cavitación: el método analítico y el método de ingeniería [38].

En el método analítico o también conocido como método numérico el cual se implanta comúnmente para predecir el inicio de la cavitación en una sola burbuja, pero rara vez dentro de una bomba [41].

La Tabla 9, describe los métodos de ingeniería que comúnmente se aplican para monitorear y determinar la cavitación en una bomba centrífuga [38].

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

	<b>Método</b>	<b>Descripción</b>
1	Determinación de la NPSH	Según la norma ISO 3555 define que la cavitación se desarrolla cuando el valor NPSH cae en un 3 %.
2	Visualización	Consiste en colocar en la tubería de succión transparente para visualizar las burbujas de vapor.
3	Método de la erosión de la pintura	Consiste en pintar el impulsor y de acuerdo al porcentaje de eliminación de la pintura indica el nivel de cavitación presente.
4	Mediciones de presión estática	Este método se basa en comparar la presión estática medida y la presión de vapor a una temperatura dada del flujo. Si el depósito de agua esta a presiones estáticas muy bajas el riesgo de cavitación aumenta.
5	Método de vibración	La señal de vibración se adquiere en la estructura de la bomba, la cavitación puede provocar una frecuencia arriba de los 2 KHz, acompañado de frecuencias discretas y sus armónicos asociados en el espectro de vibración.
6	Método de señales acústicas	La presencia de cavitación de una bomba puede ser escuchada en forma normal por el oído humano. Este método se basa en la medición del nivel de

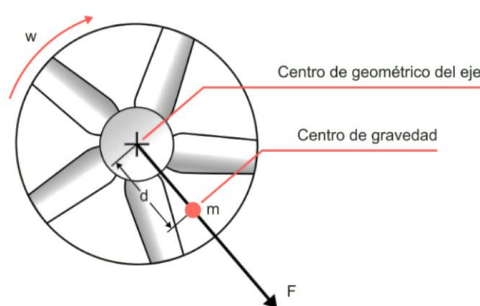
		sonido; sin embargo, todavía no se usa en industrias debido a la dificultad de excluir la contaminación acústica.
7	Método de emisiones acústicas	Se basa en mediciones de presión acústica, utiliza una banda de alta frecuencia (100 kHz - 1000 kHz). La ventaja sobre la vibración y los métodos acústicos es su capacidad para detectar el inicio de la cavitación.
8	Método de suministro de energía	Este método se basa en el análisis de firma de corriente del motor. Se basa en el 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.

## 2.9 Desbalanceo en bombas centrífugas multietapa de eje vertical

### 2.9.1 Desbalanceo y sus tipos.

El desbalanceo en bombas centrífugas constituye una de las fuentes más comunes en los problemas de vibraciones, siendo una de las causas de vibraciones excesivas. La presencia del desbalanceo como único problema en bombas se refleja en los espectros de las vibraciones medidas en los cojinetes de apoyo del rotor, como una componente definida claramente a la frecuencia de rotación del elemento desbalanceado.

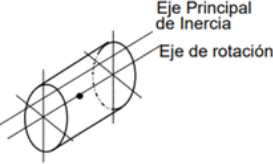
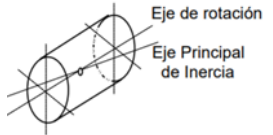
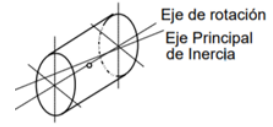
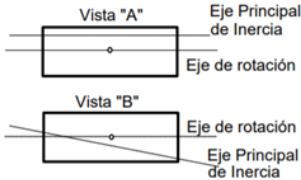
El desbalanceo se produce cuando el centro de gravedad o centro de masas del rotor no coincide con su centro de rotación o centro geométrico como se observa en la Figura 20, esto origina una fuerza centrífuga que parte desde el centro de rotación en dirección radial y gira sincronamente con el eje generando una vibración excesiva el cual se manifiesta a una frecuencia igual a  $1 \times \text{RPM}$  del elemento rotatorio desbalanceado. [42].



**Figura 20.** Diferencia entre centro de gravedad y centro geométrico.

El desbalanceo puede ser cuatro tipos de desbalances mostrados en la Tabla 10, en virtud de los cuales habrá que decidir cómo balancear el rotor. [42].

**Tabla 10** . Tipos de desbalanceo presentes en bombas.

Tipo de desbalanceo	Descripción	Gráfica
Desbalance estático	También se conoce como desbalance de fuerzas se define como aquella condición donde el eje longitudinal principal de inercia quedará por debajo del eje de rotación. Este tipo de desbalance puede identificarse también comparando las mediciones de amplitud y fase en los extremos del rotor.	
Desbalance par	Es el desbalanceo en donde el eje longitudinal principal de inercia del rotor intercepta al eje de rotación en el centro de masas del propio rotor.	
Desbalance casi – estático	En este desbalanceo el eje longitudinal principal de inercia intercepta al eje de rotación en un punto cualquiera. Generando así lecturas de fase a ambos extremos del eje con una diferencia de $\approx 180^\circ$ aunque las amplitudes diferirán sustancialmente.	
Desbalance dinámico	En este desbalanceo el eje longitudinal principal de inercia del eje no intercepta al eje de rotación y tampoco es paralelo al mismo y este tipo de desbalanceo es el más común dentro de maquinaria rotativa.	

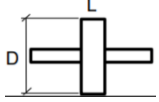
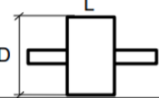
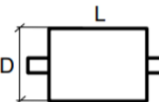
### 2.9.2 Síntomas de desbalanceo.

Para decidir que modelo se tomará para verificar el desbalanceo, no es necesario reconocer o identificar que tipo de desbalance presenta el rotor de la bomba. De igual forma, es cierto que los tipos de desbalances identificados como par, casi-estático y dinámico únicamente pueden ser corregidos en al menos dos secciones transversales del rotor.

Por ello, resulta de gran valor práctico el empleo de algunas recomendaciones como, por ejemplo, las de la firma IRD Mechanalysis desarrolladores de equipos especializados en análisis de vibraciones mejor

conocido como ADASH, en función de la relación  $L/D$  cuál es el modelo apropiado para ser utilizado durante el ejercicio de balanceo en diferentes casos los cuales se resumen en la Tabla 11 [42].

Tabla 11. Modelos de balanceo.

MODELO ROTOR	RELACIÓN $\frac{L}{D}$	MODELO DE BALANCEO		
		UN PLANO	DOS PLANOS	MÚLTIPLES PLANOS
	$L/D < 0.5$	Hasta 1000 RPM	>1000 RPM	NO
	$2 > L/D > 0.5$	Hasta 150 RPM	>100 PRM $\leq 70\%$ Vel. Crítica	>2000 RPM > 70 % Vel. Crítica
	$L/D > 2$	Hasta 100 RPM	150-2000 RPM >70 % Vel. Crítica	>2000 RPM >70 % Vel. Crítica

### 2.9.3 Efectos que produce el desbalanceo.

La variación en el desbalanceo originará una variación en el ángulo de fase de la vibración. Las fuentes de desbalanceo pueden tener naturalezas muy diferentes, tales como:

- Aglomeración, erosión y corrosión en los álabes de una bomba centrífuga.
- Falta de homogeneidad en piezas fundidas tales como: burbujas, poros y agujeros de soplado.
- Excentricidad del rotor.

### 2.9.4 Monitoreo adecuado para el desbalanceo en bombas centrífugas.

El desbalanceo del eje es un problema fundamental que ocasiona un deterioro de los demás elementos del sistema. Las señales de vibraciones mecánicas brindan información acerca del comportamiento de una bomba, debido al principio de cinemática que tienen los componentes que la conforman y al comportamiento dinámico que se genera cuando todas estas partes interactúan entre sí.

Por tal razón, se propone como un análisis de vibraciones en bombas hidráulicas centrífugas, con la intención de detectar desbalanceo con base en las condiciones de operación de la máquina. El análisis

propuesto se centra principalmente en técnicas basadas en el dominio tiempo-frecuencia, dado que permiten analizar la información sobre la frecuencia en función del tiempo y tienen una interpretación directa del proceso [43].

El monitoreo adecuado para el desbalanceo en bombas centrífugas se corrige con una compensación de masa en el punto adecuado. Con un analizador de vibraciones se puede localizar el peso y el ángulo para colocar esta masa de compensación.

Debido a que la amplitud de vibración causada por desbalanceo en bombas centrífugas es directamente proporcional a la cantidad de desbalanceo la detección se realiza mediante la configuración de una banda frecuencial de 0,8x a 1,2x RPM.

## 2.10 Simulación de fallos

En esta sección se presentarán las propuestas para simular los fallos de cavitación y desbalanceo, así como la configuración de los impulsores para representar las diferentes severidades.

### 2.10.1 Simulación fallo de cavitación

#### Propuesta para simular 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 a una cabeza de  $H=87$  m como se muestra en la Figura 21.

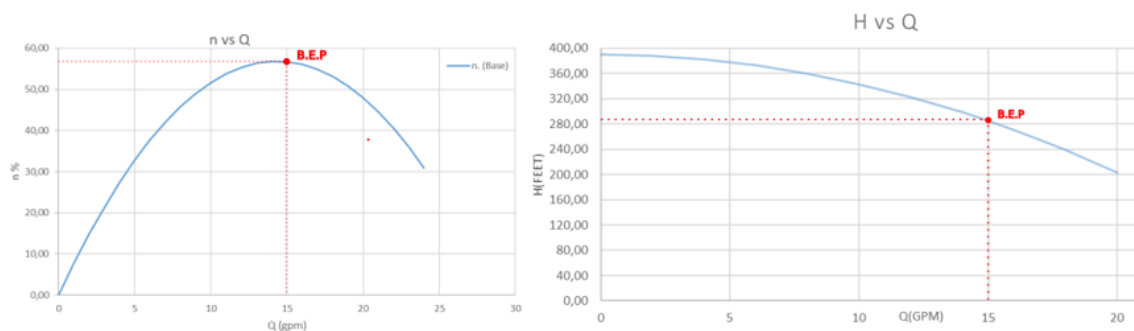
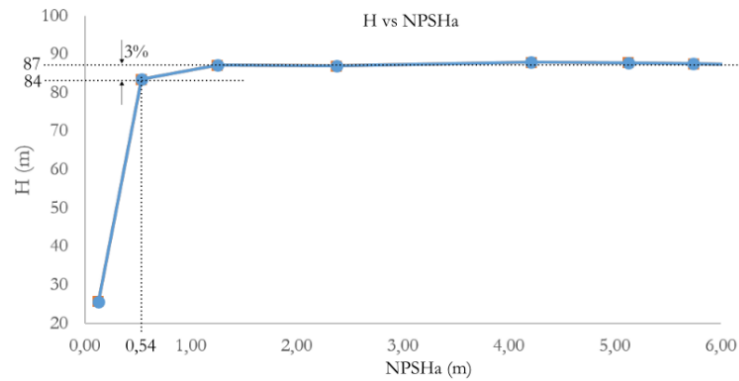


Figura 21. Curva altura-caudal (a), Curva rendimiento-caudal (b).

En la Figura 22, 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 m.c.a, en este punto se obtiene el estado de cavitación desarrollada.



**Figura 22.** 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 línea constante de  $\approx 60$  Hz.

Para perturbar el sistema generando cavitación es necesario cerrar de forma gradual la válvula en la tubería de succión, esto provocará un aumento en las pérdidas a la entrada de la bomba lo que genera una caída sustancial 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 fallo de cavitación debido a que la presión de entrada hacia la bomba será menor que la presión de vapor del líquido. De modo que:

$$NPSH_{\text{disponible}} < NPSH_{\text{requerida}} \rightarrow \text{CAVITACIÓN}$$

### 2.10.2 Simulación de fallo de desbalanceo

La severidad por desbalanceo se determina mediante la regla de tres entre el volumen removido y el volumen total de la cubierta frontal del impulsor. Los datos de la Tabla 12 muestran el volumen removido para cada caso de severidad, los cuales también se muestran de forma gráfica en la Tabla 12.

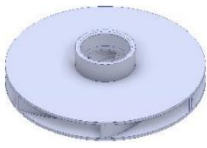
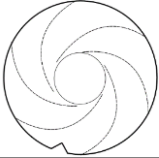
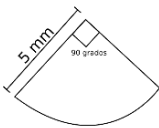
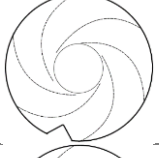
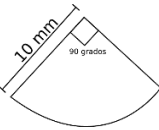
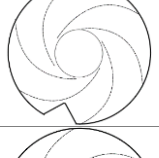
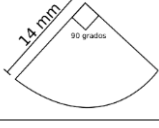
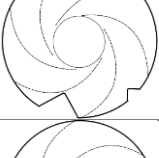
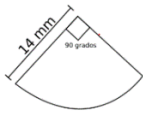
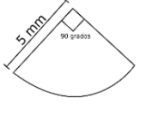
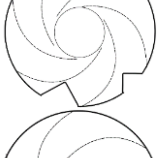
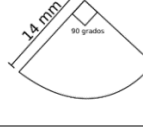
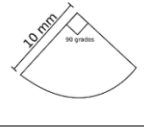

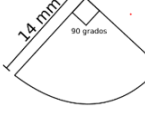



**Tabla 12.** Severidad y combinaciones para simulación de fallo de desbalanceo.

Niveles	Dimensiones de volumen removido (mm)	Volumen removido $mm^3$	
Normal	0x0mm		0
Leve	5x5mm/10x10mm	55,2	1,5
Moderado	(2) 5x5mm/10x10mm/(2) 14x14mm	248,2	6,8
Severo	(2) 5x5mm/(2) 10x10mm/(5) 14x14mm	566,4	15,5

La Tabla 13, expone los fallos propuestos por desbalanceo como resultado de la erosión por cavitación.

**Tabla 13.** Fallo propuesto por desbalanceo como resultado de la erosión por cavitación.

Combinación	Grafico	Dimensiones
-		
4_1		
4_2		
4_3		
4_4		 
4_5		 
4_6		 

La Tabla 14, muestra la combinación de impulsores que van a ser reemplazados para la simulación de las diferentes severidades en el fallo de desbalanceo.

**Tabla 14.** Combinaciones para simulación de fallo de desbalanceo.

<b>Severidad</b>	<b>10 S</b>	<b>9 S</b>	<b>8 S</b>	<b>7 S</b>	<b>6 S</b>	<b>5 S</b>
<b>Normal</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Leve</b>	10 S_4_2	9 S_4_1	-	-	-	-
<b>Moderado</b>	10 S_4_4	9 S_4_3	8 S_4_2	7 S_4_1	-	-
<b>Severo</b>	10 S_4_6	9 S_4_5	8 S_4_4	7 S_4_3	6 S_4_2	5 S_4_1

## 2.11 Señales de video.

Las señales de video pueden ser analógicas o digitales. La señal de video analógica se obtiene provocando cambios de la intensidad de la luz en señales eléctricas las cuales se imprimen en materiales fotosensibles como las de los VHS [44].

Las señales de vídeo digitales son consideradas una señal RGB debido a que está conformada por una mezcla de colores Rojo-Verde-Azul (Red-Green-Blue), los colores primarios de cualquier imagen y que todo equipo de visualización, transmisión, almacenamiento y transporte de señales de video lo utilizan como tres señales separadas, asignando un valor de voltaje eléctrico que corresponde al nivel de luminosidad y/o combinación de colores RGB de cada píxel permitiendo transmitir imágenes de muy alta calidad debido a que en su transmisión se genera con un ancho de banda por arriba de los 100 MHz [6].

### 2.11.1 Ventajas y limitaciones del monitoreo de señales de video.

Actualmente existen distintas metodologías para la medición de vibraciones con cámaras de video en donde se detectan vibraciones mediante la técnica espejo. Este método permite analizar patrones de movimientos [6].

Las ventajas de este método basado en cámaras de video compactas son:

- Inversión baja.
- Método no invasivo.
- Permita superar las desventajas de la instrumentación convencional al no requerir el uso de equipos complementarios como el sistema de adquisición de datos, fuente de poder, pc.

- El tiempo de instalación instrumental contempla montar el trípode y asegurar el ángulo correcto respecto a los cuerpos de interés. Experimentalmente representa una ventaja sobre el tiempo de montaje de los acelerómetros y ultrasónicos, que aparte de la instalación de equipos complementarios, el cableado es un trabajo riguroso y delicado para asegurar la correcta toma de datos.
- El sistema requiere la postedición de videos, proceso con un costo temporal no menor (cortar, remover distorsión, descomprimir).

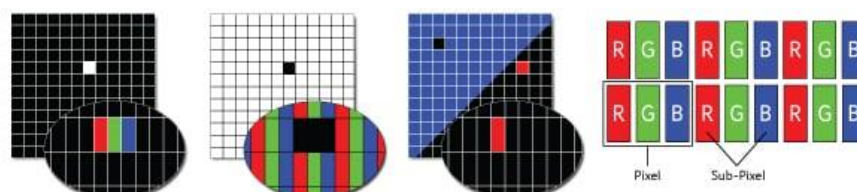
Las limitaciones van en relación a la calidad de resultados que deseamos obtener:

- Espacio de grabación sin interferencias de luz estroboscópicas.
- Espacio necesario para poder captar todos los elementos de la maquinaria.
- Calidad y Fps de nuestro equipo de grabación son directamente proporcionales a los detalles que se podrá observar dentro del video.

### 2.11.2 Técnicas de procesamiento de señales de video: Técnica espejo:

La técnica espejo rastrea micro movimientos de un píxel en cada fotograma mediante un algoritmo el cual también permite elegir un área específica de referencia para que automáticamente estas vibraciones sean apartadas del resto de los puntos como son puntos fijos y puntos móviles. La técnica espejo excluye completamente las perturbaciones externas, dentro del análisis de la vibración y permitiendo que la estructura se deforme naturalmente al ser una técnica no invasiva [45].

La Figura 23, muestra la composición de un píxel RGB y la exclusión de una parte del mismo para formar un subpíxel siendo esta la aplicación en cada punto ya sea fijo o móvil [45].



**Figura 23.** Composición de un píxel y subpíxel en diferentes casos.

### 2.11.3 DragónVisión®

Es un software de análisis de vibraciones que rastrea micro movimientos en grabaciones de video ordinarias a través de un complejo algoritmo como se observa en la Figura 24, DragónVisión® analiza cada uno de los cuadros del video detectando pequeños cambios en el movimiento de puntos específicos, para convertirlos posteriormente en señales de vibración. Utilizando lo que los desarrolladores lo llaman zona de referencia, permite establecer como su nombre lo dice una zona de referencia en la que el software DragónVisión® restará el movimiento de esta área del resto de los puntos para completar un análisis diferencial. Esto también es muy útil para casos en los que el movimiento de la cámara se ve afectado por la vibración de la mano o del fondo.

De hecho, puede detectar miles de puntos de vibración en un solo video, convirtiéndolo en una herramienta ideal para muchos tipos de análisis de vibraciones que de otra forma consumiría mucho tiempo realizar [45].



**Figura 24.** Puntos de interés dentro de video.

Con el software DragónVisión® se pueden detectar múltiples fallas, principalmente relacionadas con bajas de frecuencias (1- 20 Hz) y fase, por ejemplo:

- Desbalanceo
- Desalineación
- Holgura mecánica

- Eje doblado
- Excentricidad
- Resonancia
- Frecuencias naturales (por prueba funcional)
- Ruido eléctrico

### **Análisis de vibraciones no invasivas**

Los acelerómetros cambian el comportamiento de las superficies a las que están unidos generalmente debido a su peso; DragónVisión® ofrece una solución a este problema con su zona de referencia. Dado que no necesita conectar ningún sensor a las superficies, las desviaciones de los objetos ocurrirán naturalmente, este software como se observa en la Figura 25 incorpora múltiples filtros para analizar sus videos como son:

- Filtros de paso de banda: permiten filtrar áreas del espectro para seguir el movimiento en múltiples frecuencias al mismo tiempo.
- Filtros de frecuencia única: permiten concentrarse en una frecuencia particular para aislar el resto de las fallas durante el proceso. Lo que le permite hacer análisis de fase y simulaciones específicas.
- Filtro anti-aliasing que utiliza la comparación de canales cruzados. De esta manera, las frecuencias inexistentes producidas por el fenómeno de Aliasing debido a la baja frecuencia de muestreo de las cámaras de video se eliminan de la FFT con lo cual luego se procesará el espectro mediante cualquier otra técnica ya sea FFT, Cepstrum o Evolvente [45].

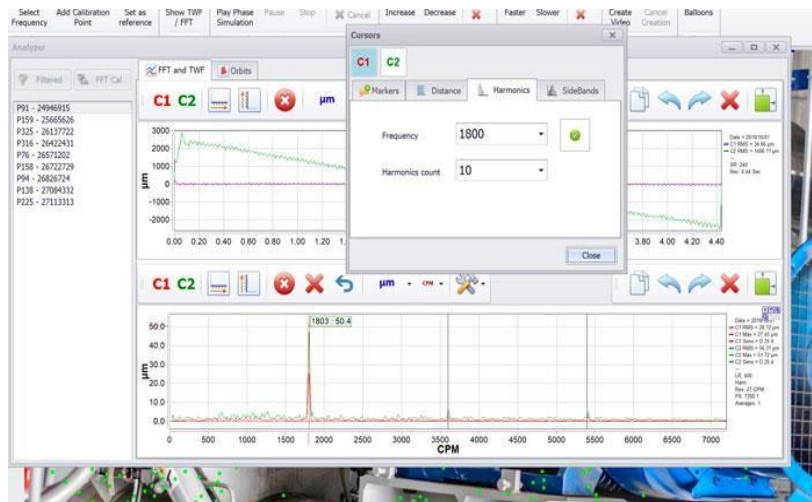


Figura 25. Espectro adquirido del procesamiento de señales de video.

#### 2.11.4 Características de hardware y video óptimas para DragónVisión®

Los requerimientos mínimos para la instalación del software DragónVisión® son:

- Intel Celeron (2.5 GHz/400 MHz) o superior
- Mínimo 4 GB DDR2 de RAM
- Windows 8 o superior
- 750 Mb en espacio de disco
- 1 puerto USB 2.0
- Conexión a internet

En cuanto a características de video, se debe tomar en cuenta que cada teléfono celular, usuario y entorno son diferentes, es decir, cada uno se tiene que adaptar a su entorno y a las herramientas que tiene a su alcance.

La iluminación se enfoca en dos aspectos: primero el aspecto técnico, tener una intensidad suficiente para que la cámara dé un rendimiento óptimo, y segundo el aspecto artístico: iluminar para conseguir un resultado agradable. Para la presente investigación es relevante únicamente el aspecto técnico.

DragónVisión® funciona con cualquier cámara, sin embargo, mientras mejor sea la calidad de video mejor serán los resultados, en la Tabla 15 se resumen los parámetros mínimos para una buena calidad de video

**Tabla 15.** Parámetros mínimos para la obtención de una buena calidad de video.

<b>Factores</b>	<b>Descripción</b>
Luz	≈ 2000 lúmenes, entre 15° y 45° en posición lateral con relación a la cámara
Distancia	≈ 1,5 m
Resolución	> HD
Frecuencia	> 60 Fps
Formato	AVI, MOV, MP4

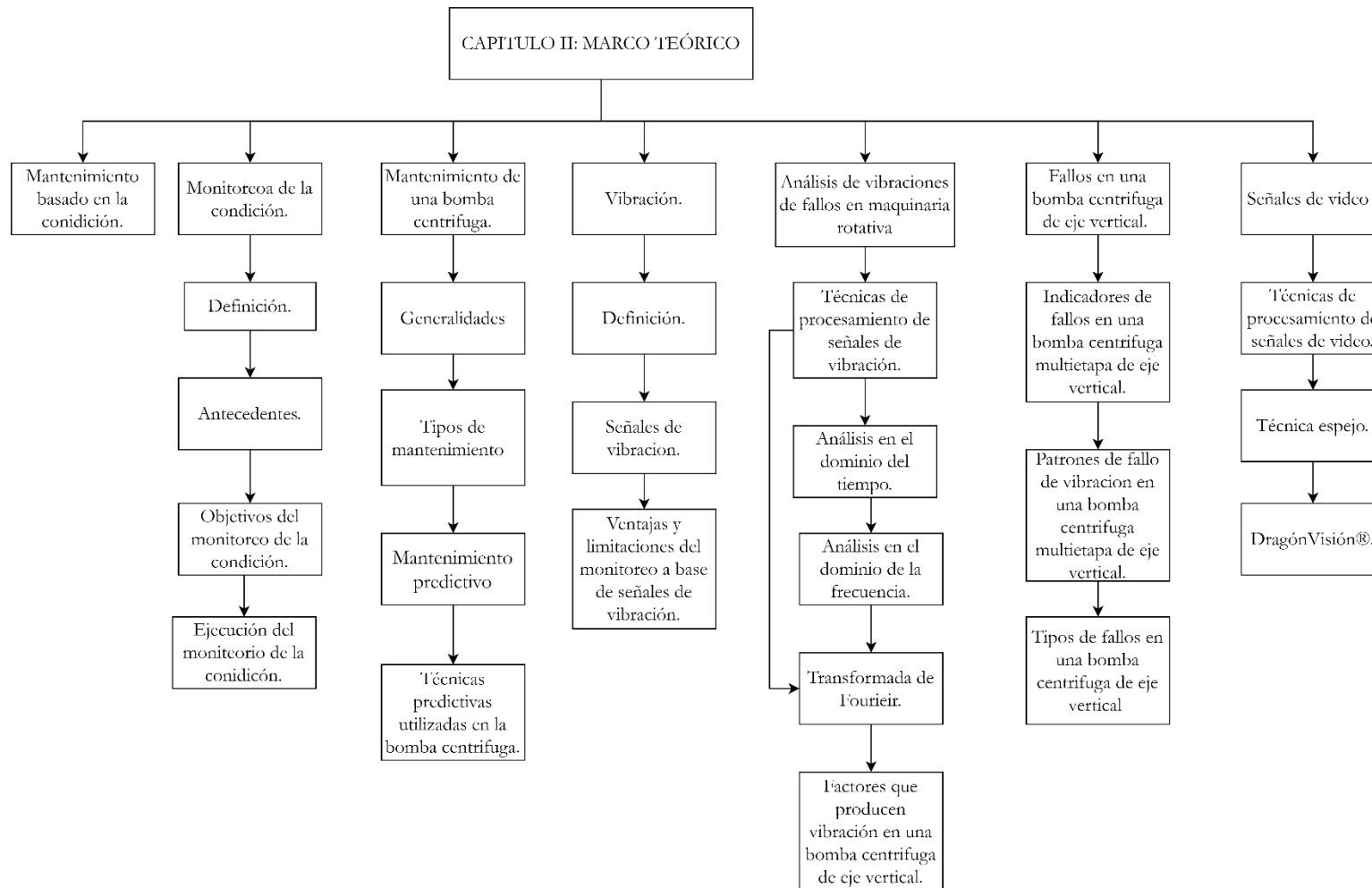


Figura 26. Resumen del capítulo 2.



### 3 CAPÍTULO 3. – ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE MONITOREO DE LA CONDICIÓN

#### 3.1 Metodología para adquisición de señales de video y vibración

##### 3.1.1 Banco de pruebas experimentales

La experimentación se ha desarrollado en la Universidad Politécnica Salesiana en donde el grupo de investigación y desarrollo en tecnología industrial (GIDTEC) tiene acceso a los laboratorios de análisis de vibraciones, que cuenta con varios equipos para el monitoreo de la condición en maquinaria rotativa, para este caso se utilizará el banco de pruebas para bomba centrífuga en el cual se emplazarán los acelerómetros y se procederá a la grabación de un video para la adquisición de las señales de vibración mediante el software DragónVisión®.

La Figura 27, muestra un diagrama del banco de pruebas con los que cuenta los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, el cual se observan los sistemas A y B descritos en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Sistemas del banco de pruebas experimental.

Sistema	Descripción
A	Bomba centrífuga multietapa de eje vertical, instrumentación, iluminación, cámara.
B	Sistema de adquisición de datos



**Figura 27.** Banco de pruebas experimental para bomba centrífugas.

Las Figuras 28, 29 muestran la disposición física, instrumentación e iluminación que tiene el sistema A del banco de pruebas experimental.

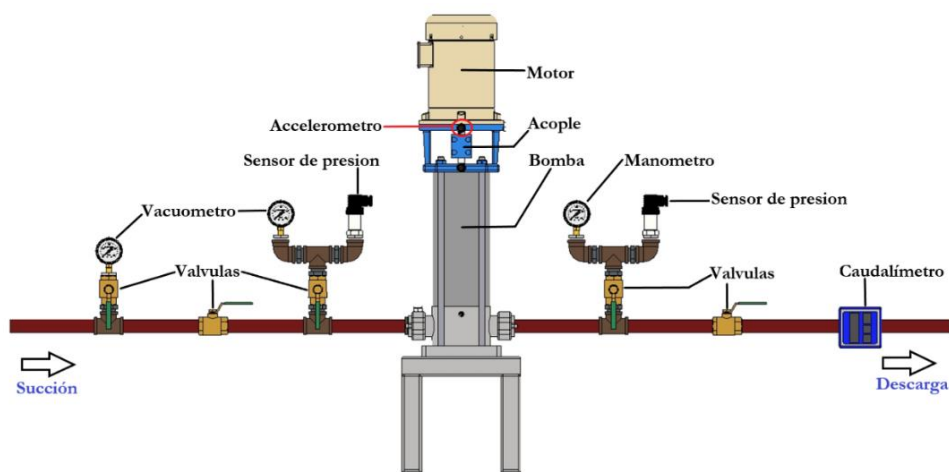
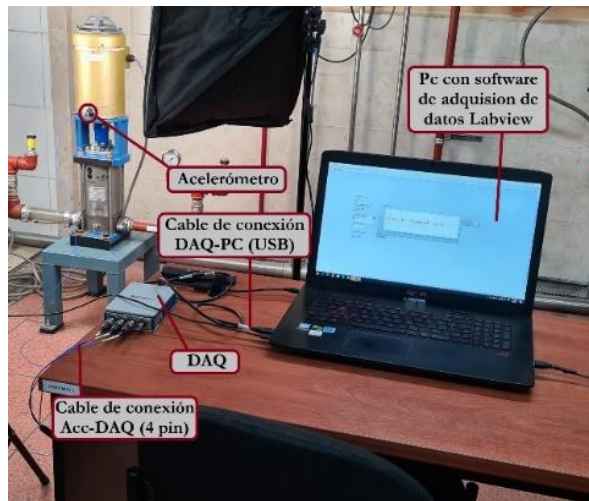


Figura 28. Sistema A Banco de pruebas experimental.



Figura 29. Sistema de iluminación del banco de pruebas experimental.

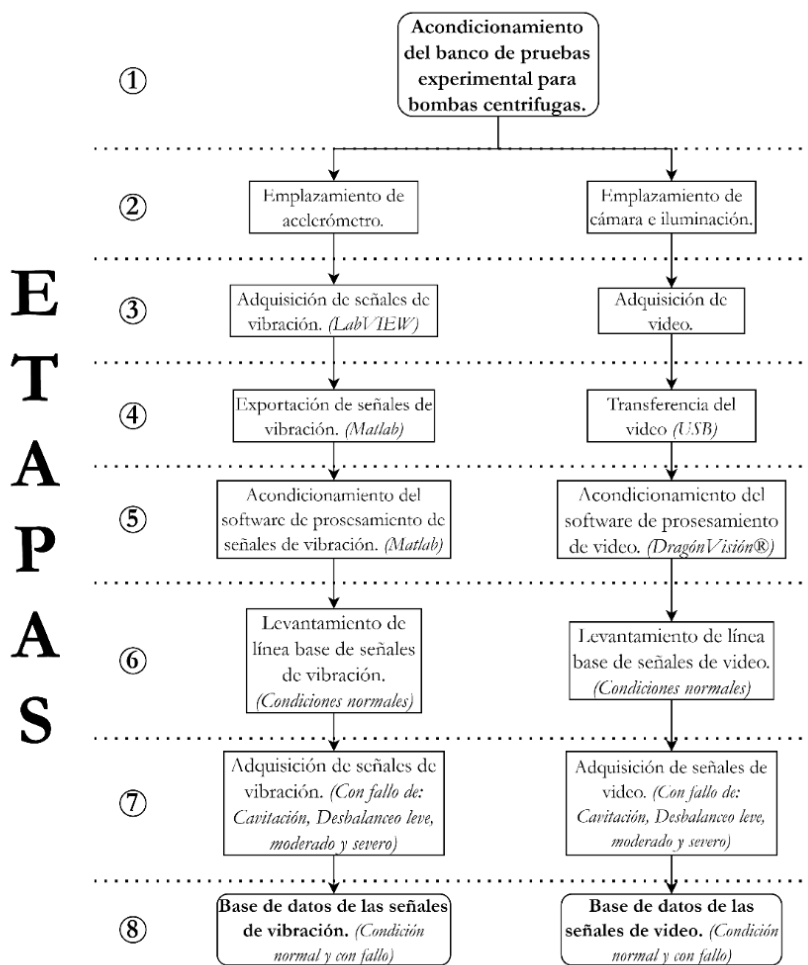
La Figura 30, se muestra los elementos y disposición física del sistema de adquisición de datos del banco de pruebas experimental.



**Figura 30.** Sistema B de adquisición de datos del banco de pruebas experimental.

### 3.2 Proceso y procedimiento de experimentación

El proceso de experimentación ofrece y garantiza la reproducibilidad de la adquisición de datos para las señales de vibración y video. En la Figura 31 se plantea un proceso experimental el cual consta de ocho etapas.



**Figura 31.** Proceso experimental para la adquisición de señales de vibración mediante acelerómetro y DragónVisión®.

A continuación, se detalla cada una de las etapas del proceso experimental para la adquisición de señales de vibración mediante acelerómetro y DragónVisión®.

### 3.2.1 Etapa 1: Acondicionamiento del banco de pruebas experimental para bombas centrífugas.

El objetivo de las condiciones experimentales es asegurar la reproducibilidad del experimento para lo cual las condiciones ambientales del laboratorio y los parámetros de operación deben estar definidas y en lo posible sean las mismas para todos los experimentos, las mismas que se verifican antes de iniciar con la puesta en arranque del banco de pruebas experimental y durante la adquisición de las señales.

Para asegurar el valor, estos parámetros se ocupará un termómetro, higrómetro y un luxómetro.

La Tabla 17, muestra los el rango de valores de las condiciones ambientales.

**Tabla 17.** Condiciones ambientales requeridos para la operación del banco de pruebas.

Parámetro	Unidad	Rango	Valor	Observaciones
Temperatura ambiente	°C	Min.	14	Estos parámetros deben ser medidos mínimo a 1 metro a la redonda del banco de pruebas.
Humedad relativa	-	Min.	42 %	
		Max.	65 %	
Luminosidad	Luxes (Lux)	Max	2000	Este parámetro se ocupará un luxómetro el cual nos ayudará a verificar la intensidad de luz con la cual se está realizando el video.

La Tabla 18, presenta los parámetros de operación de la bomba centrífuga multietapa de eje vertical 3SV10GE4F20 usada para este proyecto.

**Tabla 18.** Parámetros de operación de la bomba centrífuga 3SV10GE4F20.

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

A continuación, se detallan cada una de las actividades que deben ser realizadas antes de la puesta en arranque del banco de pruebas experimental.

- Inspeccionar la bomba visualmente, asegurando el correcto montaje de todos los elementos mecánicos, la alineación del grupo, pernos de anclaje y posicionamiento de válvulas.
- Inspeccionar visualmente que no se encuentren fugas en las bridas y acoples, tanto en la línea de succión como en la descarga.
- Comprobar el perfecto cebado de la bomba, con la eliminación de aire contenido especialmente en la tubería de succión.
- Si la bomba esta provista de sello mecánico es imprescindible efectuar el llenado del cuerpo de la bomba, incluso para verificar el sentido de giro del motor el cual girará a mano fácilmente.

Una vez realizada todas las actividades anteriores se arrancará el motor eléctrico:

- Alcanzada la velocidad de giro nominal, abrir progresivamente la válvula de descarga, hasta obtener la presión y/o el caudal requeridos.

- Evitar el funcionamiento prolongado de la bomba con la válvula de descarga cerrada, debido a que, al transformarse la energía en calor pueden producirse roces y agarrotamientos.
- Si la bomba no da las condiciones de servicio requeridas, verificar nuevamente el cebado y el sentido de giro.

Para simular las diferentes condiciones de operación en la bomba centrífuga multietapa GOULDS e-SV 3SV10GE4F20 se considera los datos teóricos de caudal  $Q=15$  GPM y presión  $P=90$  m.c.a, como valores nominales y así 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, donde 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 cavitarse.

Para provocar la cavitación se deberá estrangular la válvula en la succión (Ver detalle A Figura 32) de tal manera que supere la caída del 3 % y la NPSr sea mayor a la NPSd, de esta manera se garantiza una cavitación además que se presente un cambio sonoro en el sistema debido al colapso de las burbujas.



**Figura 32.** Sistema de bombeo planta A-1.

### 3.2.2 Etapa 2: Emplazamiento de los sensores

#### Acelerómetro

Las señales de vibración son ondas mecánicas propagadas a través de un medio material [46]. Estas señales son captadas por un acelerómetro triaxial PCB 356A15, el cual cuando una fuerza de aceleración actúa sobre el sensor, las placas capacitivas en el interior se mueven una a otra, esto provoca que la capacitancia entre ellas cambie. A partir de dichos cambios en la capacitancia, se puede determinar la aceleración.

En la Figura 33 se muestra la conexión del acelerómetro triaxial capacitivo PCB 356A15, el cual se conecta al módulo NI-9234 mediante un cable 4-pin MIL-C-5015 blindado de 4 conductores. Luego, el módulo NI-9234 encaja en el chasis cDAQ-9171, posteriormente el computador recibe las señales del chasis a través de un cable USB. Las señales se muestran en la interfaz gráfica del software LabVIEW.



**Figura 33.** Secuencia de la conexión real del sistema de adquisición de señales de vibración.

Según la norma ISO 20816-8:2018 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, transversal y/o vertical [47].

En este experimento los sensores fueron ubicados de modo que recopilen señales de vibración de los elementos mecánicos críticos como sello mecánico, impulsores y rodamientos. En la Figura 34 se muestra la ubicación del acelerómetro triaxial.



**Figura 34.** Ubicación acelerómetro triaxial.

### Cámara de video

Teniendo en cuenta los parámetros recomendados por los desarrolladores del software de procesamiento de video DragónVisión®, la ubicación adecuada de la cámara se realizará como se muestra en la Figura 35.



**Figura 35.** Emplazamiento de cámara.

La Tabla 19, muestra los valores recomendados de distancia y luminosidad.

**Tabla 19.** Parámetros recomendados de distancia y luminosidad.

Factores	Samsung S20+
Luz	≈ 1650 lúmenes (lux), 45° en posición lateral con relación a la cámara.
Distancia	≈ 1,5 m



### 3.2.3 Etapa 3: Adquisición de señales.

#### Señales de vibración.

El GIDTEC ha desarrollado un programa para la adquisición de señales vibración. El programa fue desarrollado en el software LabVIEW. En la Figura 36, se visualiza la interfaz que se explica a detalle en la Tabla 20.

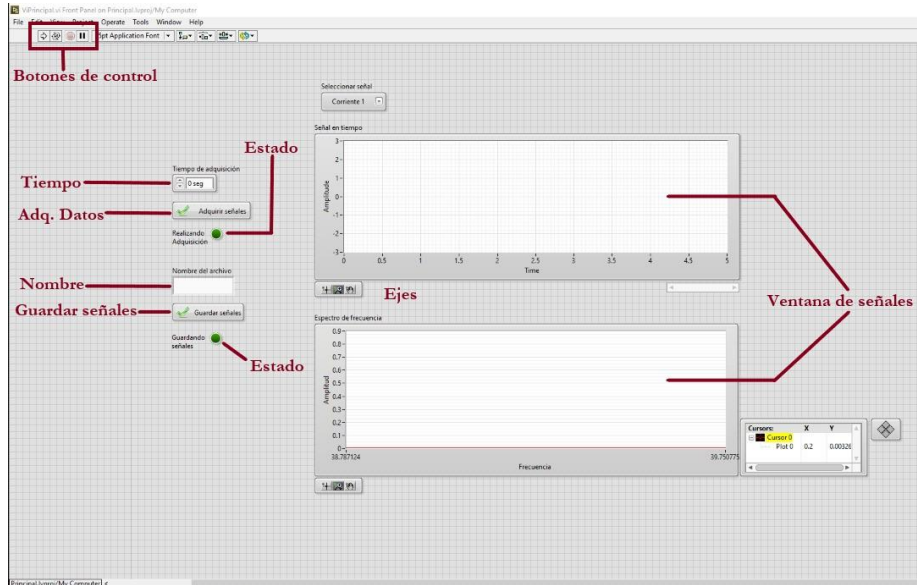


Figura 36. Interfaz gráfica del programa LabVIEW.

Tabla 20. Descripción de la interfaz gráfica del software LabVIEW.

Descripción de la interfaz gráfica	
Botones	Descripción
Botones de control	Permite realizar acciones como iniciar, inicio en ciclo, y detener la ejecución del programa.
Botón de adquisición	Inicia la adquisición de señales.
Botón de guardar señales	Guarda las señales en la ubicación especificada.
Ejes	Activa la visualización en la ventana de señales el espectro en los ejes X, Y, Z
Tiempo de adquisición	Espacio para insertar el tiempo de adquisición de las señales.
Nombre de archivo	Espacio para insertar el nombre del archivo a generarse.
Ubicación de archivo	Se selecciona la dirección en la cual va a estar guardado el archivo.
Visualización de estado	Led indicador de si esta en ejecución el programa.
Ventana de señales	Ventana donde se verifica de manera visual las señales adquiridas.

Usando el programa proporcionado por el GIDTEC se tomará las señales de vibración con los parámetros especificados en la Tabla 21.


**Tabla 21.** Parámetros para la adquisición de señales de vibración en LabVIEW.

Parámetro	Valor
Tiempo	15 Segundos
Repeticiones	10
Ejes	X, Y, Z
Muestras por segundo	50000

### Señales de video.

Una vez adaptado el entorno, las señales de video se obtuvieron con un equipo Samsung Galaxy S20+ y con los parámetros especificados en la Tabla 22. Con la consideración que el tiempo de adquisición de video se multiplica por un factor de “32” conversión ya que es adquirido con supercámara lenta; es decir el tiempo de grabación es de 1 segundo, pero el tiempo de duración del video generado es de 32 segundos

**Tabla 22.** Especificación de video para los de equipos a utilizar.

Factores	Samsung S20+
Resolución	1280 x 720 HD
Frecuencia	960 Fps
	MP4
Formato	
Tiempo	1 segundo grabación = 32 segundos de video

### 3.2.4 Etapa 4: Exportación de señales de vibración y transferencia de video.

#### Exportación de señal de vibración.

Para la exportación de nuestra señal el GIDTEC ha desarrollado un programa (script) en Matlab que usa los datos adquiridos previamente LabVIEW y para su correcta ejecución necesitamos saber la ubicación detallada (ruta de almacenamiento) de cada señal de vibración y la frecuencia de muestreo (Fs) especificada en la etapa anterior que es de: 50000 como se muestra en la Figura 37.

```

%% ***** GRAFICA SEÑALES *****
%% Codigos iniciales
clc;clear all;close all;
%% Carga de archivo LabVIEW
load 'C:\Users\Christian\Documents\Tesis\Base de datos\Condiciones Normales\Acelerómetro\ DB1BC_R1C1N.mat' %Load data
%% Carga de datos: senal - sensor
x=ddata.Analog50k.TDMSAnalog50k.Acelerometer0; %seleccionar fila (sensor) de acuerdo a EP
fs=50000; %Frecuencia de muestreo
%% Calculo del tiempo

```

Figura 37. Script en Matlab para exportación de datos de vibración.

### Exportación de video.

Una vez adquiridas las señales de video se realiza exportación de las mismas con la secuencia de conexión, así como se muestra en la Figura 38. Los archivos de video generados por el celular deben ser renombrados de acuerdo a la base de datos que se está generando.



Figura 38. Secuencia de conexión del sistema de exportación de señales de video.

### 3.2.5 Etapa 5: Acondicionamiento del software de procesamiento de señales de vibración y video.

#### Acondicionamiento del software de procesamiento de vibración Matlab.

Para el procesamiento de las señales de vibración se usa el mismo programa (Script) que se usó en la Etapa 4 y que se muestra en la Figura 39.

```

Editor - D:\Descargas\TOTAL.m
1 %% ***** GRAFICA SEÑALES *****
2 %% Codigos iniciales
3 clc;clear all;close all;
4 %% Carga de archivo LabVIEW
5 load 'C:\Users\Christian\Documents\Tesis\Base de datos\Condiciones Normales\Acelerómetro\ DB1BC_RICIN.mat' %Load data
6 %% Carga de datos: señal - sensor
7 x=data.Analog50k.TIMSAnalog50k.Acelerometer0; %seleccionar fila (sensor) de acuerdo a EP
8 fs=50000; %frecuencia de muestreo
9 %% cálculo del tiempo
10 t=(1/fs):(1/fs):length(x)/fs;
11 %% SENAL DOMINIO DEL TIEMPO: Original
12 figure(1)
13 subplot(2,3,1)
14 plot(t,x,'b','LineWidth',1); grid on; set(gcf,'position',[50 50 1450 700]); xlabel('Tiempo (s)');ylabel('Aceleración (m/s^2)'); hold on;
15 set(gca, 'FontName', 'Garamond', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold');
16 title(' ACELERACIÓN', 'FontSize', 10);
17 axis ([5 5.16 min(x) max(x)]); %Sección de espectro, comentar para ver la señal completa
18 %% FFT ESPPECTRO SENAL ORIGINAL
19 %% Cálculo de fft
20 xF=[fs/length(x):fs/length(x):floor(fs/2)]; %Ajuste de Nyquist
21 xA=abs(fft(x)); % Se toma solo el absoluto de la fft.
22 xA=xA(1:length(xF))/(fs*5); % Ajuste de la amplitud a solo la mitad de la fft y escalado de la amplitud.
23 %% Grafica fft
24 figure(1)
25 subplot(2,3,4)
26 plot(xF,xA,'b','LineWidth',1); grid on; xlabel('Frecuencia (Hz)'); ylabel('Aceleración(m/s^2)');hold on;
27 set(gca, 'FontName', 'Garamond', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold');
28 title('FFT-Aceleración', 'FontSize', 10);
29 axis ([0 1200 min(xA) max(xA)+0.1]); %Sección de espectro, comentar para ver la señal completa
30 %% ENVOLVENTE HILBERT
31 % % Envolvente
32 xE=hilbert(x);

```

Parámetros señal de vibración en dominio del tiempo: dominio y rango de visualización, fuente, color, cuadrícula.

Parámetros señal de vibración en dominio de la frecuencia: dominio y rango de visualización, fuente, color, cuadrícula.

Figura 39. Acondicionamiento de software de procesamiento de señales de vibración.

Una vez introducido todos los parámetros presionamos el botón de “Run” como se observa en la Figura 40.



Figura 40. Barra de herramientas software Matlab.

La figura 41, muestra cuando script procesa nuestra señal de vibración y da como resultado 6 gráficas de las cuales la que se va a usar en la evaluación será la *FFT - Velocidad*.

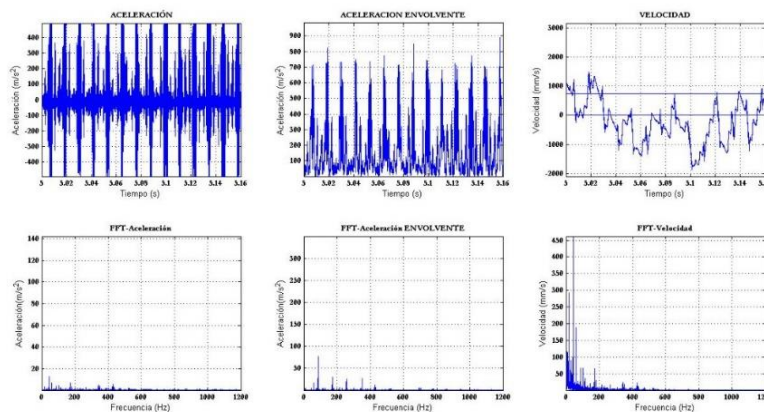


Figura 41. Resultado luego de procesar las señales de vibración.

### Acondicionamiento del software de procesamiento de video DragónVisión®.

Para la correcta adquisición de señales de video se debe realizar la calibración del software DragónVisión®. La cual se realizó con el uso de un patrón mediante distancia de un punto inicial (P0) y un punto final (P1) como se muestra en la Figura 42.



Figura 42. Calibración del Software DragónVisión®.

En la Figura 43, se puede visualizar la interfaz del software de procesamiento de señales de video DragónVisión® cuyos botones se explican en la Tabla 23.

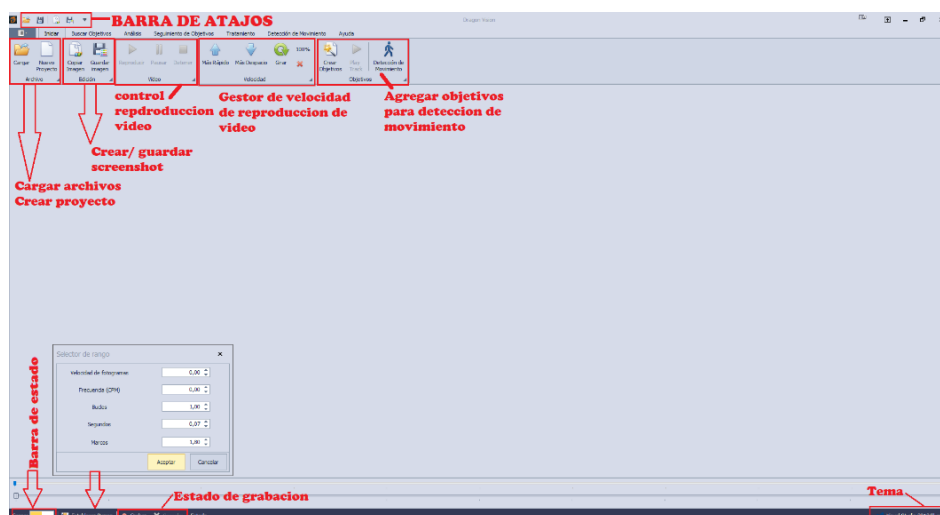


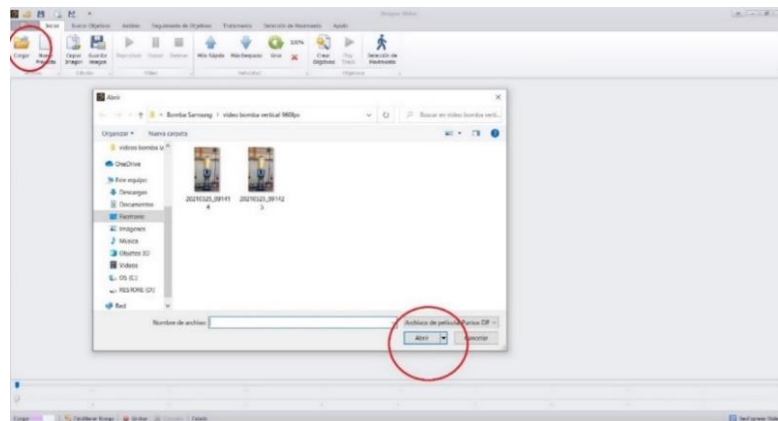
Figura 43. Interfaz de gráfica del programa para la adquisición de señales de video.

**Tabla 23.** Descripción de botones del software DragónVisión®.

Descripción de la interfaz gráfica	
Botones	Descripción
Cargar	Permite Cargar Archivos de video compatibles con DragónVisión®.
Nuevo proyecto	Permite al usuario Crear un nuevo proyecto para su análisis.
Copiar imagen	Realizar captura de imagen.
Cuadro de reproducción	Permite controlar el video; pausarlo, detenerlo cuando se requiera.
Gestor de velocidad de reproducción de video.	Acelera o ralentiza la reproducción de un Archivo de video.
Crear objetivos	Identifica objetivos basados en la configuración de calidad definida en cada caso que se encuentra en <b>Buscar objetivos: configuración.</b>
Detección de movimiento	Crea un modelo a color y en escala de grises que permite visualizar el desplazamiento según su color y sombra.

A continuación, se muestra el proceso a seguir para procesar las señales de video en DragónVisión®.

- **Paso 1:** Se procede a cargar el archivo de video previamente exportado que se va a analizar como se muestra en la Figura 44, posteriormente se pulsa a abrir.



**Figura 44.** Carga de videos a analizar.

- **Paso 2:** Ya cargado el video se dirige a la sección objetivos, en esta se selecciona el área de análisis mediante puntos móviles que son los que van a estar en movimiento cuando la bomba esté encendida, y estáticos que son aquellos que no presentan movimiento como se observa en la Figura 45.

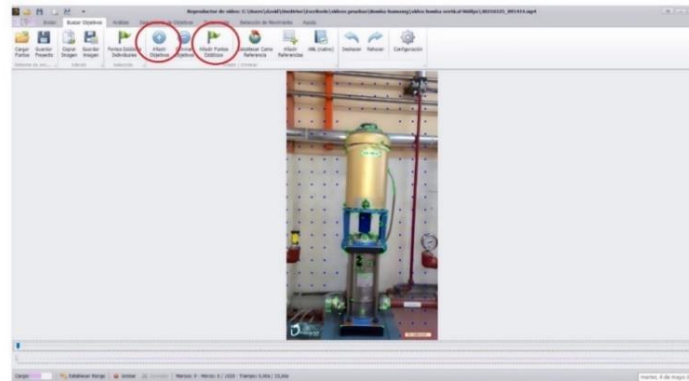


Figura 45. Selección del área de análisis mediante puntos fijos y móviles.

- **Paso 3:**

En la sección análisis, se ingresa la velocidad de fotogramas (FPS) del video y se selecciona la calibración mediante distancia, para este trabajo el patrón mide 15 cm.

Para iniciar el proceso de análisis dar clic en “procesar vibración” y esperar a que finalice el tiempo de procesamiento de la señal de video como se observa en la Figura 46.

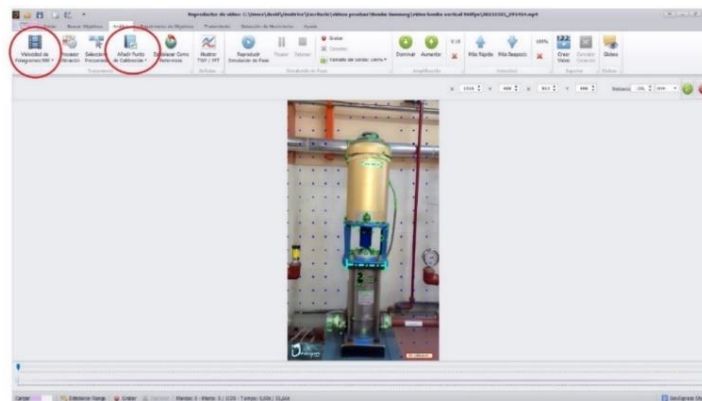
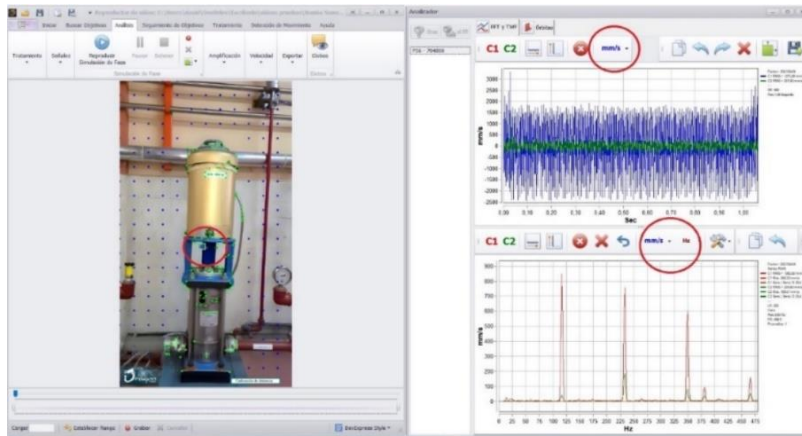


Figura 46. Calibración y procesamiento de la señal de video.

- **Paso 4:**

Una vez procesada la señal de video se selecciona el punto de interés y se da click en mostrar TWF/FFT, el software mostrara la gráfica e información de dicho punto. La señal de vibración que se muestra en la parte superior está en el dominio del tiempo y la inferior en dominio de la frecuencia; donde el eje vertical representa distancia y el horizontal ciclos por segundo CPM o hercios HZ, así como se muestra en la Figura 47.



**Figura 47.** Gráficas espectros de señal de vibración en el dominio del tiempo.

### 3.2.6 Etapa 6: Levantamiento de línea base de señales de vibración y video.

La línea base consiste en la primera adquisición de las señales de vibración y video, las cuales son adquiridas cuando las condiciones de trabajo de la bomba centrífuga multietapa de eje vertical son óptimas, de modo que establece un punto de partida de los experimentos realizados, para posteriormente instaurar una comparación con las señales adquiridas en condiciones normales y de fallo, con el propósito de realizar la detección de fallos simulados y por ende la evaluación de las señales de vibración y video.

#### **Validación de línea base.**

Para validar las señales de vibración y video adquiridos con las condiciones especificadas en la etapa 1 (ver sección 3.2.1), es necesario seguir el proceso que se detalla en la Figura 48.



**Figura 48.** Proceso por seguir para la validación de la línea base.



- Verificación visual.

La verificación visual permite inspeccionar errores en montaje, tanto en la parte mecánica, como en los sensores y en la unidad de adquisición de datos. Este paso permite inspeccionar alineación, mal ajuste de pernos, mala conexión de sensores, cruce de cables, entre otros.

- Verificación de ruidos extraños.

Luego de realizar la comprobación visual, se procede a realizar la verificación de ruidos anormales utilizando el sentido auditivo, esta comprobación permite verificar que al momento de poner en marcha la bomba centrífuga no se generen ruidos extraños, los cuales nos pueden indicar la presencia de un mal ensamblaje o fallo en algún elemento mecánico.

- Verificación de frecuencias características.

Cuando una bomba centrífuga se encuentra en buenas condiciones, se generan frecuencias características que se determinan mediante la velocidad de giro.

Para comprobar el banco de pruebas experimentales en condiciones normales se utiliza las frecuencias características usando datos físicos y de operación de cada elemento de la bomba centrífuga que se muestran en la Tabla 24.

**Tabla 24.** Frecuencias características bomba centrífuga multietapa vertical 3SV10GE4F20.

Elemento	Descripción u observación	Datos	Formula	Velocidad (RPM)	Frecuencia (Hz)	Periodo (1/F) (segundos)
<b>Motor</b>	trifásico, frecuencia de alimentación 60 Hz,	Velocidad nominal= 3500 RPM	$Frecuencia = \frac{Velocidad}{60}$	3500	58.33	0.0171
<b>Paso de alabes (BPF)</b>	6 alabes por impulsor	Na=Numero de alabes=6	$Frecuencia = \frac{Rpm_{motor} * Na}{60}$		350.00	0.0029
<b>Rodamiento 6205</b> Rodamiento del acople del motor.	Nb=Numero de rodillos (mm)	9				
	Bd=diámetro de rodillo (mm)	7.938				
	Pd=diámetro primitivo (mm)	39.04				
	θ=Angulo de contacto (grados)	0				
	Rpm= velocidad de giro eje	3500.00				
	BPFI	Frecuencia de pista interna		$BPFI = \left(\frac{Nb}{2}\right) * \left(1 + \left(\frac{Bd}{Pd}\right) * (\cos\theta)\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$	315.87	0.0032
	BPFO	Frecuencia de pista externa		$BPFO = \left(\frac{Nb}{2}\right) * \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right) * (\cos\theta)\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$	209.13	0.0048
	BSF	Frecuencia de giro de los rodillos		$BSF = \left(\frac{Pd}{2 * Bd}\right) * \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right)^2 * (\cos\theta)^2\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$	137.51	0.0073
	Defecto BSF	Frecuencia defecto BSF= El doble de la frecuencia de giro de la bola (BSF)		Defecto BSF=2*BSF	275.03	0.0036
	FTF	Frecuencia de la Jaula		$FTF = \frac{1}{2} * \left(1 - * \left(\frac{Bd}{Pd}\right) * (\cos\theta)\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$	23.24	0.0430
<b>Rodamiento 6203</b> Rodamiento del ventilador.	Nb=Numero de rodillos (mm)	8				
	Bd=diámetro de rodillo (mm)	6.747				
	Pd=diámetro primitivo (mm)	28.5				
	θ=Angulo de contacto (grados)	0				
	Rpm= velocidad de giro eje	3500.00				
	BPFI	Frecuencia defecto pista interna		$BPFI = \left(\frac{Nb}{2}\right) * \left(1 + \left(\frac{Bd}{Pd}\right) * (\cos\theta)\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$	288.57	0.0035
	BPFO	Frecuencia defecto pista externa		$BPFO = \left(\frac{Nb}{2}\right) * \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right) * (\cos\theta)\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$	178.09	0.0056
	BSF	Frecuencia de giro de los rodillos		$BSF = \left(\frac{Pd}{2 * Bd}\right) * \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right)^2 * (\cos\theta)^2\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$	116.30	0.0086
	Defecto BSF	Frecuencia defecto BSF= El doble de la frecuencia de giro de la bola (BSF)		Defecto BSF=2*BSF	232.60	0.0043
	FTF	Frecuencia de la Jaula		$FTF = \frac{1}{2} * \left(1 - * \left(\frac{Bd}{Pd}\right) * (\cos\theta)\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$	22.26	0.0449

## Resultados de la línea base.

- Verificación de frecuencias características.

En la Figura 49, se presentan las señales de vibración en condiciones normales en el dominio de la frecuencia de la bomba centrífuga adquiridas en los tres ejes por el acelerómetro triaxial 1 (A1).

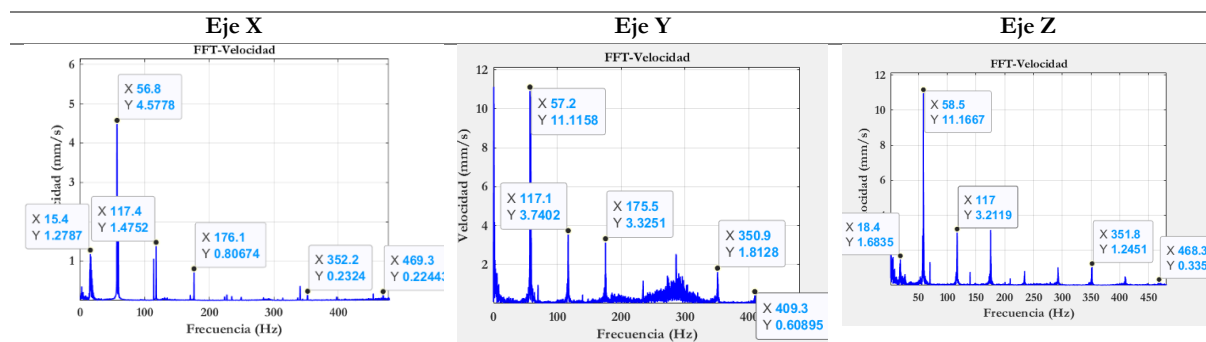


Figura 49. Señal de vibración por el acelerómetro A1.

La Figura 50, se presentan la señal de video en condiciones normales procesada por el software DragónVisión® en el punto P71: 599:789 y eje x (canal 1) que es en donde se puede visualizar los fallos de cavitación y desbalanceo.

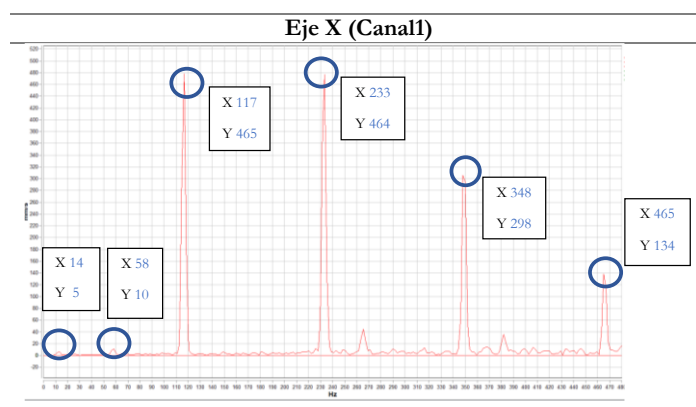


Figura 50. Señal de video en el dominio de la frecuencia procesada por el software DragónVisión®.

Estas señales servirán para ser comparadas cuando se implementen los fallos en la bomba centrífuga multietapa de eje vertical.

En la Tabla 25 se presentan las frecuencias características calculadas y las obtenidas con acelerómetro y DragónVisión®.

**Tabla 25.** Frecuencias características presentes en la señal de vibración adquirida por el acelerómetro A1.

Elementos	Frecuencia (Hz) Amplitud (mm/s)	DragónVisión®	ACC X
FTF de la jaula rodamiento	22.26	15.4	16.2
	0.8601	11	0.57755
Giro de motor (A-1x)	56.4	58.3	57.5
	0.8601	9	4.725
Frecuencia de giro de rodamientos (BSF)	115.3	116.7	117.3
	-	85	2.6298
2X Defecto BSF	230.6	233.4	229.5
	-	48	0.16032
Paso de alabes (BPF)	350	350.1	351.8
	0.03667	127	0.36441
4X Defecto BSF	469.2	469	468.9
	-	95	0.27201

### 3.2.7 Etapa 7: Adquisición de señales de vibración y video.

En esta sección se muestra de manera resumida (ver Tablas 26-30) los experimentos realizados para la adquisición de base de datos de señales de vibración y video en condiciones normales y con fallo de cavitación y desbalanceo leve, moderado y severo.

- Experimento 1: Adquisición de señales de vibración y video en condiciones normales.

**Tabla 26.** Adquisición de señales de vibración y video en condiciones normales.

Parámetro	Señal de vibración	Señal de video
Equipos	Acelerómetro triaxial PCB356A15 Módulo NI-9234 Chasis de módulos (cDAQ9171) Computador portátil ASUS Programación en LabVIEW Script Matlab	Teléfono celular Samsung Galaxy S9+ Trípode Equipo de iluminación Luxómetro Computador portátil ASUS DragónVisión®
Banco	Banco de pruebas experimentales para bombas centrífugas	Banco de pruebas experimentales para bombas centrífugas
Fallo	Ninguno	Ninguno
Condiciones experimentales (Presión válvula de descarga)	C1 (5.5 Bar) C2 (6.5 Bar) C3 (7.5 Bar) C4 (8.5 Bar) C5 (9.5 Bar) C6 (10.4 Bar)	C1 (5.5 Bar) C2 (6.5 Bar) C3 (7.5 Bar) C4 (8.5 Bar) C5 (9.5 Bar) C6 (10.4 Bar)
Temperatura ambiente	≈ 19 °C	≈ 19 °C
Humedad relativa	≈ 61.20%	≈ 61.20%
Luminosidad	≈ 1650 Lux.	≈ 1650 Lux.
Velocidad nominal constante	3500 RPM	3500 RPM
Repeticiones	10	3
Tiempo	15 segundos	3 segundos

- Experimento 2: Adquisición de señales de vibración y video con fallo de cavitación.

**Tabla 27.** Adquisición de señales de vibración y video con fallo de cavitación.

Parámetro	Señal de vibración	Señal de video
Equipos	Acelerómetro triaxial PCB356A15 Módulo NI-9234 Chasis de módulos (cDAQ9171) Computador portátil ASUS Programación en LabVIEW Script Matlab	Teléfono celular Samsung Galaxy S9+ Trípode Equipo de iluminación Luxómetro Computador portátil ASUS DragónVisión®
Banco	Banco de pruebas experimentales para bombas centrífugas	Banco de pruebas experimentales para bombas centrífugas
Fallo	Cavitación	Cavitación
Condiciones experimentales (Presión válvula de descarga)	C1 (5.5 Bar)	C1 (5.5 Bar)
	C2 (6.5 Bar)	C2 (6.5 Bar)
	C3 (7.5 Bar)	C3 (7.5 Bar)
	C4 (8.5 Bar)	C4 (8.5 Bar)
	C5 (9.5 Bar)	C5 (9.5 Bar)
	C6 (10.4 Bar)	C6 (10.4 Bar)
Temperatura ambiente	≈ 19 °C	≈ 19 °C
Humedad relativa	≈ 61.20%	≈ 61.20%
Luminosidad	≈ 1650 Lux.	≈ 1650 Lux.
Velocidad nominal constante	3500 RPM	3500 RPM
Repeticiones	10	3
Tiempo de adquisición	15 segundos	3 segundos

- Experimento 3: Adquisición de señales de vibración y video con fallo de desbalanceo leve.

**Tabla 28.** Adquisición de señales de vibración y video con fallo de desbalanceo leve.

Parámetro	Señal de vibración	Señal de video
Equipos	Acelerómetro triaxial PCB356A15 Módulo NI-9234 Chasis de módulos (cDAQ9171) Computador portátil ASUS Programación en LabVIEW Script Matlab	Teléfono celular Samsung Galaxy S9+ Trípode Equipo de iluminación Luxómetro Computador portátil ASUS DragónVisión®
Banco	Banco de pruebas experimentales para bombas centrífugas	Banco de pruebas experimentales para bombas centrífugas
Fallo	Desbalanceo leve	Desbalanceo leve
Condiciones experimentales (Presión válvula de descarga)	C1 (5.5 Bar)	C1 (5.5 Bar)
	C2 (6.5 Bar)	C2 (6.5 Bar)
	C3 (7.5 Bar)	C3 (7.5 Bar)
	C4 (8.5 Bar)	C4 (8.5 Bar)
	C5 (9.5 Bar)	C5 (9.5 Bar)
	C6 (10.4 Bar)	C6 (10.4 Bar)
Temperatura ambiente	≈ 19 °C	≈ 19 °C
Humedad relativa	≈ 61.20%	≈ 61.20%
Luminosidad	≈ 1650 Lux.	≈ 1650 Lux.
Velocidad nominal constante	3500 RPM	3500 RPM
Repeticiones	10	3
Tiempo de adquisición	15 segundos	3 segundos = 32 segundos cámara superlenta

- Experimento 4: Adquisición de señales de vibración y video con fallo de desbalanceo moderado.

**Tabla 29.** Adquisición de señales de vibración y video con fallo de desbalanceo moderado.

Parámetro	Señal de vibración	Señal de video
Equipos	Acelerómetro triaxial PCB356A15 Módulo NI-9234 Chasis de módulos (cDAQ9171) Computador portátil ASUS Programación en LabVIEW Script Matlab	Teléfono celular Samsung Galaxy S9+ Trípode Equipo de iluminación Luxómetro Computador portátil ASUS DragónVisión®
Banco	Banco de pruebas experimentales para bombas centrífugas	Banco de pruebas experimentales para bombas centrífugas
Fallo	Desbalanceo moderado	Desbalanceo moderado
Condiciones experimentales (Presión válvula de descarga)	C1 (5.5 Bar) C2 (6.5 Bar) C3 (7.5 Bar) C4 (8.5 Bar) C5 (9.5 Bar) C6 (10.4 Bar)	C1 (5.5 Bar) C2 (6.5 Bar) C3 (7.5 Bar) C4 (8.5 Bar) C5 (9.5 Bar) C6 (10.4 Bar)
Temperatura ambiente	≈ 19 °C	≈ 19 °C
Humedad relativa	≈ 61.20%	≈ 61.20%
Luminosidad	≈ 1650 Lux.	≈ 1650 Lux.
Velocidad nominal constante	3500 RPM	3500 RPM
Repeticiones	10	3
Tiempo de adquisición	15 segundos	3 segundos

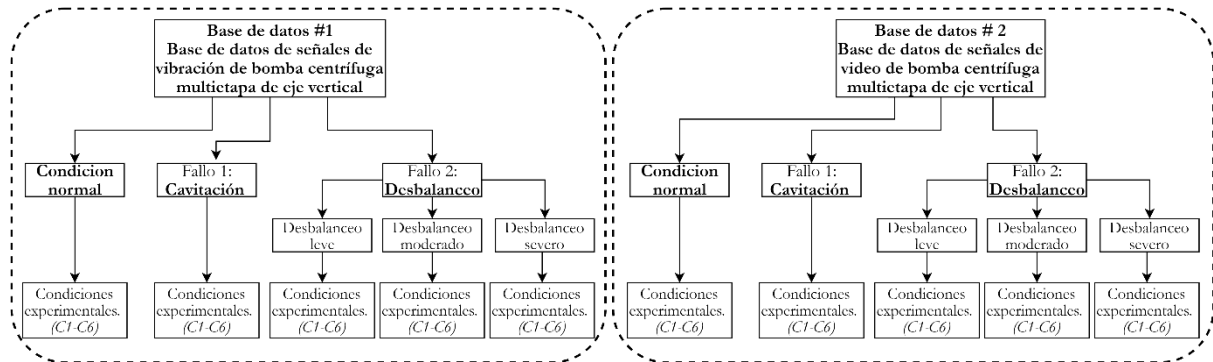
- Experimento 5: Adquisición de señales de vibración y video con fallo de desbalanceo severo.

**Tabla 30.** Adquisición de señales de vibración y video con fallo de desbalanceo moderado.

Parámetro	Señal de vibración	Señal de video
Equipos	Acelerómetro triaxial PCB356A15 Módulo NI-9234 Chasis de módulos (cDAQ9171) Computador portátil ASUS Programación en LabVIEW Script Matlab	Teléfono celular Samsung Galaxy S9+ Trípode Equipo de iluminación Luxómetro Computador portátil ASUS DragónVisión®
Banco	Banco de pruebas experimentales para bombas centrífugas	Banco de pruebas experimentales para bombas centrífugas
Fallo	Desbalanceo severo	Desbalanceo severo
Condiciones experimentales (Presión válvula de descarga)	C1 (5.5 Bar) C2 (6.5 Bar) C3 (7.5 Bar) C4 (8.5 Bar) C5 (9.5 Bar) C6 (10.4 Bar)	C1 (5.5 Bar) C2 (6.5 Bar) C3 (7.5 Bar) C4 (8.5 Bar) C5 (9.5 Bar) C6 (10.4 Bar)
Temperatura ambiente	≈ 19 °C	≈ 19 °C
Humedad relativa	≈ 61.20%	≈ 61.20%
Luminosidad	≈ 1650 Lux.	≈ 1650 Lux.
Velocidad nominal constante	3500 RPM	3500 RPM
Repeticiones	10	3
Tiempo de adquisición	15 segundos	3 segundos

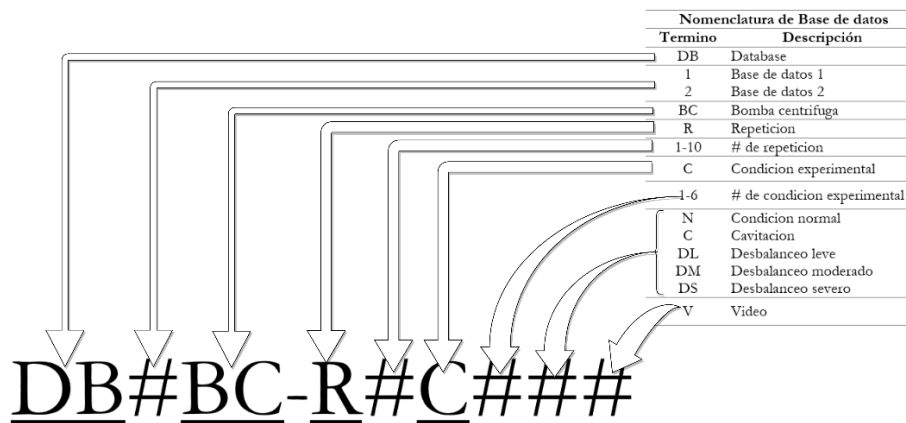
### 3.2.8 Etapa 8: Base de datos adquiridas.

La Figura 51, muestra un resumen de la base de datos adquiridas con los experimentos 1, 2, 3, 4, 5 en la sección 3.2.7.



**Figura 51.** Base de datos obtenida de la bomba centrífuga multietapa de eje vertical.

La Figura 52, muestra la nomenclatura que se estableció a cada señal adquirida dentro de las bases de datos, con el objetivo de tener los datos organizados.



**Figura 52.** Nomenclatura de las bases de datos.

La Tabla 31, muestra el resumen de la base de datos #1 de señales de vibración de bomba centrífuga multietapa de eje vertical 3SV10GE4F20.

**Tabla 31.** Base de datos #1 de señales de vibración de bomba centrífuga multietapa de eje vertical.

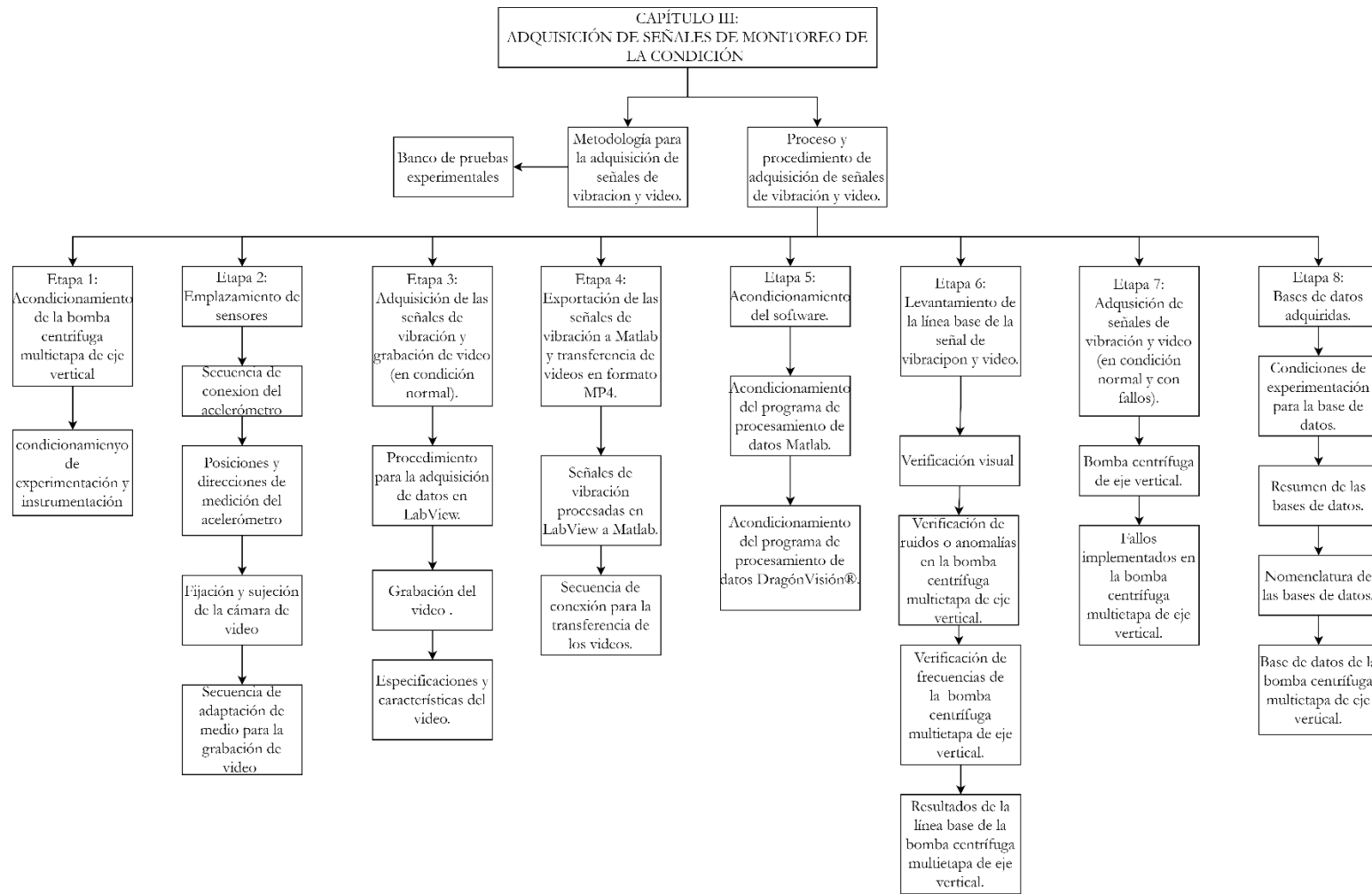
Nombre Base de datos		Base de datos señales de vibracion de bomba centrífuga multietapa de eje vertical 3SV10GE4F20		
Peso total		4.87 GB		
Nro. Carpetas		34		
Nro. de archivos		300		
Nombre de las señales	Repeticiones	Condiciones experimentales (Presión válvula de salida)	Condición de fallo	Nro. Muestras
DB1BC-R#C1NV	10	C1 (5.5 Bar)	Condiciones normales	60
DB1BC-R#C2NV	10	C2 (6.5 Bar)		
DB1BC-R#C3NV	10	C3 (7.5 Bar)		
DB1BC-R#C4NV	10	C4 (8.5 Bar)		
DB1BC-R#C5NV	10	C5 (9.5 Bar)		
DB1BC-R#C6NV	10	C6 (10.4 Bar)		
DB1BC-R#C#CV	10	(C1-C6)	Cavitación	60
DB1BC-R#C#DLV	10	(C1-C6)	Desbalanceo Leve	60
DB1BC-R#C#DMV	10	(C1-C6)	Desbalanceo Moderado	60
DB1BC-R#C#DSV	10	(C1-C6)	Desbalanceo Severo	60

La Tabla 32, muestra el resumen de la base de datos #2 de señales de video de bomba centrífuga multietapa de eje vertical 3SV10GE4F20.

**Tabla 32.** Base de datos #2 de señales de video de bomba centrífuga multietapa de eje vertical.

Nombre Base de datos		Base de datos señales de video de bomba centrífuga multietapa de eje vertical 3SV10GE4F20		
Peso total		3.15 GB		
Nro. Carpetas		34		
Nro. de archivos		90		
Nombre de las señales	Repeticiones	Condiciones experimentales (Presión válvula de salida)	Condición de fallo	Nro. Muestras
DB2BC-R#C1NV	3	C1 (5.5 Bar)	Condiciones normales	18
DB2BC-R#C2NV	3	C2 (6.5 Bar)		
DB2BC-R#C3NV	3	C3 (7.5 Bar)		
DB2BC-R#C4NV	3	C4 (8.5 Bar)		
DB2BC-R#C5NV	3	C5 (9.5 Bar)		
DB2BC-R#C6NV	3	C6 (10.4 Bar)		
DB2BC-R#C#CV	3	(C1-C6)	Cavitación	18
DB2BC-R#C#DLV	3	(C1-C6)	Desbalanceo Leve	18
DB2BC-R#C#DMV	3	(C1-C6)	Desbalanceo Moderado	18
DB2BC-R#C#DSV	3	(C1-C6)	Desbalanceo Severo	18





**Figura 53.** Resumen capítulo 3.

## 4 CAPÍTULO 4. – EVALUACIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 Metodología para la evaluación de señales de vibración y video.

A continuación, en la Figura 54 se detalla la metodología de evaluación de señales de vibración y video de las bases de datos adquiridas en el capítulo 3, que comprende cinco etapas.

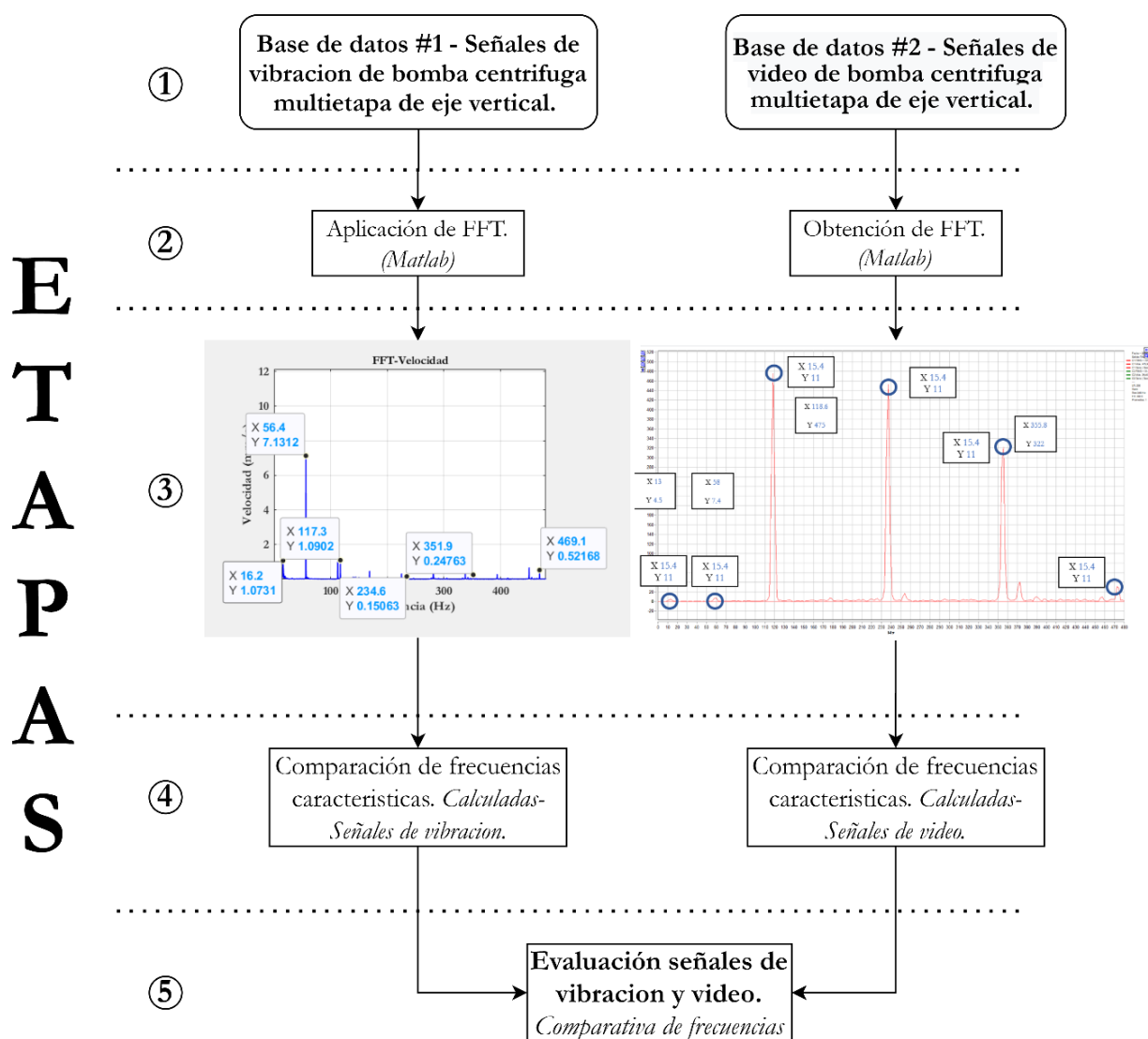


Figura 54. Proceso de evaluación de señales de vibración y video.

## 4.2 Proceso de evaluación de señales de vibración y video.

El proceso de evaluación de las señales de vibración y video de las bases de datos #1 y #2 está conformado por cinco etapas:

### 4.2.1 Etapa 1: Ingreso señal de vibración y video

En esta etapa, ingresan las señales de vibración extraída de la base de datos #1 al software de procesamiento Matlab y de igual manera la señal de video extraída de la base de datos #2 al software DragónVisión®

### 4.2.2 Etapa 2: Aplicación de la transformada rápida de Fourier.

Una vez que están ingresadas las señales de vibración y video en su respectivo software de procesamiento, se aplica a cada una de las señales la transformada rápida de Fourier con la finalidad de transformar la señal de vibración y video en el dominio del tiempo a una señal en el dominio de la frecuencia.

### 4.2.3 Etapa 3: Comparación de las frecuencias características de las señales de vibración y video en el dominio de la frecuencia

En la Tabla 33, se observa la tabla ejemplo de comparación de frecuencias características entre las calculadas, Matlab y DragónVisión® comprobando el incremento o decremento de frecuencias con respecto a la línea base.

**Tabla 33.** Tabla ejemplo de comparación frecuencias características.

Elementos	Frecuencia (Hz)	DragónVisión®	Diferencia	ACC X	Diferencia
FTF de la jaula rodamiento	-	-	-	-	-
Giro de motor (A-1x)	-	-	-	-	-
Frecuencia de giro de rodamientos (BSF)	-	-	-	-	-
2X Defecto BSF	-	-	-	-	-
Paso de alabes (BPF)	-	-	-	-	-
4X Defecto BSF	-	-	-	-	-

#### 4.2.4 Etapa 4: Evaluación comparativa de las frecuencias características de la señal de vibración y video en el dominio de la frecuencia

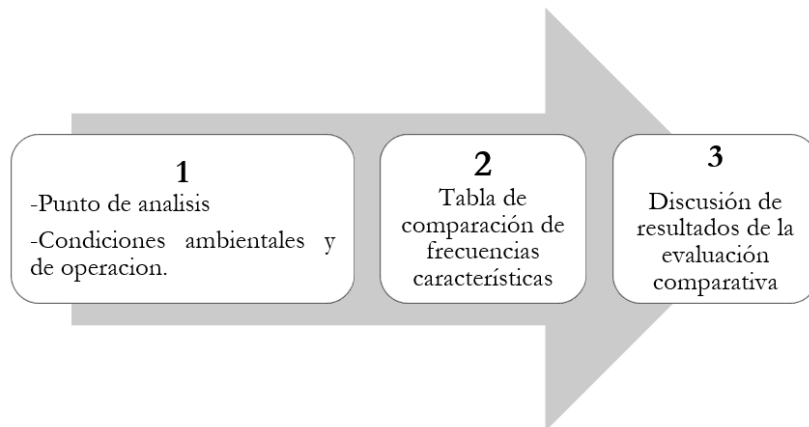
La Tabla 34, muestra un ejemplo de la discusión de resultados de la evaluación comparativa entre las señales de vibración y video obtenidas con Matlab y DragónVisión®.

**Tabla 34.** Evaluación comparativa de las señales de vibración y video.

	<b>Observaciones</b>	<b>DragónVisión®</b>	<b>ACC</b>	<b>Diferencias</b>
1	Se aprecia la señal FFT obtenida con AAC	-	-	-
2	Se aprecia la señal FFT obtenida en DragónVisión®	-	-	-
3	Incremento o decremento en frecuencia de las frecuencias características	-	-	-
4	Se identifica de manera fácil la frecuencia característica de elementos	-	-	-
5	Presencia de bandas laterales	-	-	-
6	Presencia de armónicos	-	-	-

#### 4.3 Evaluación de las señales de vibración y video de bombas centrífugas multietapa de eje vertical en el dominio de la frecuencia.

En esta sección para cada una de las bases de datos adquiridas, se va a presentar el punto de análisis con las condiciones ambientales y de operación, para posteriormente la tabla de comparación de frecuencias características y por último la discusión de resultados de la evaluación comparativa entre las señales de vibración y video como se muestra en la Figura 55.

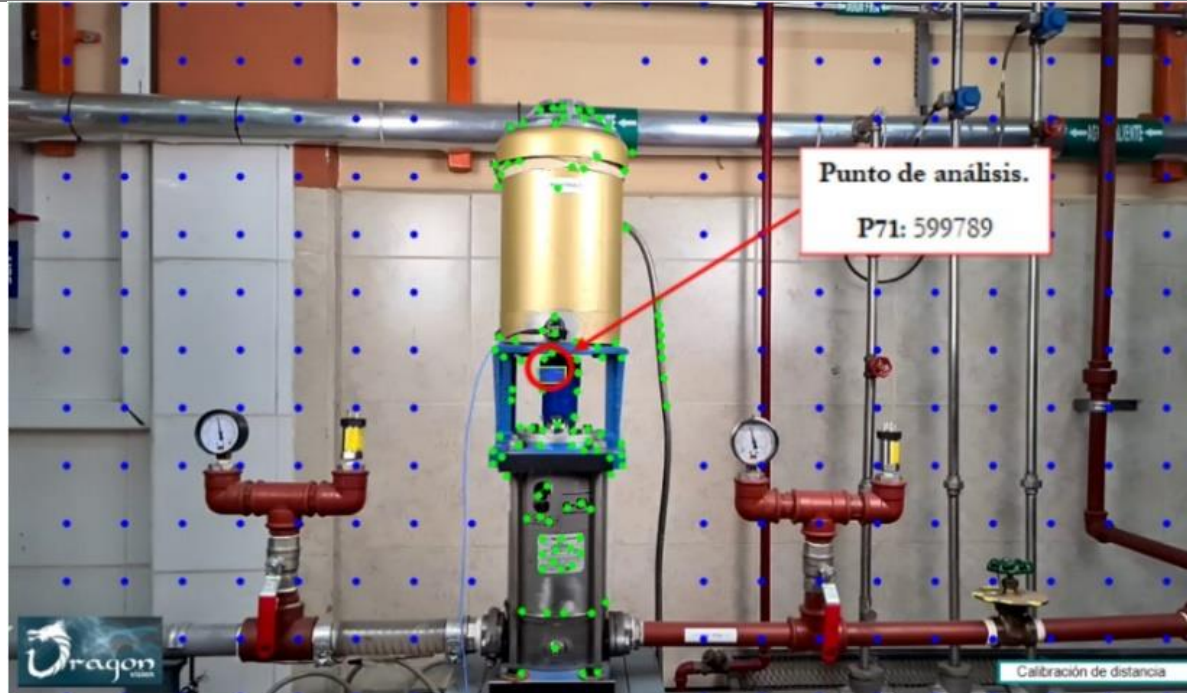


**Figura 55.** Proceso de evaluación.

4.3.1 Condiciones normales.

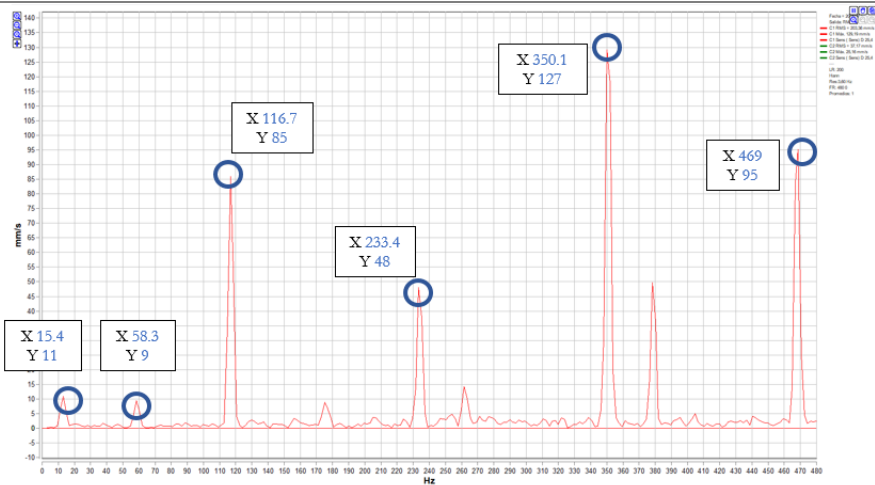
**Tabla 35.** Señales de vibración y video de bomba centrífuga multietapa en condiciones normales.

**EVALUACIÓN DE SEÑALES OBTENIDAS EN BOMBA CENTRÍFUGA MULTIETAPA VERTICAL MODELO 3SV10GE4F20**

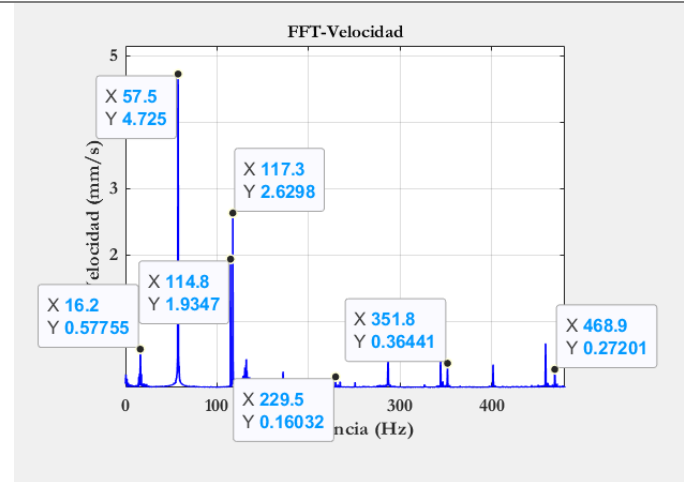


<b>Condición:</b>	Normal.	<b>Fps:</b>	960
<b>Angulo de toma de video:</b>	Eje X.	<b>Resolución:</b>	HD
<b>Señal:</b>	Dominio de la frecuencia.	<b>Frecuencia de línea:</b>	60 Hz.
<b>Luxómetro:</b>	≈ 1650 Lux.	<b>Calibración DragónVisión®:</b>	Distancia.
<b>Temperatura:</b>	≈ 19.2 °C	<b>Teléfono:</b>	Samsung Galaxy +S20.
<b>Humedad:</b>	≈ 61.20%	<b>Tiempo de grabacion de video:</b>	3 segundos
<b>Tiempo de adquisición de ACC:</b>	10 segundos.	<b>Punto de análisis:</b>	P71: 599789

DragónVisión®



Matlab



En la Tabla 36, se presenta las frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga en condiciones normales que van a ser comparadas entre la calculadas y las obtenidas con Matlab y DragónVisión® comprobando el incremento o decremento de frecuencias y/o amplitud con respecto a la línea base.

**Tabla 36.** Frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga en condiciones normales.

Elementos	Frecuencia (Hz)	DragónVisión®	Diferencia Calculada- DragónVisión®	ACC X	Diferencia Calculada- ACC X
F1F de la jaula rodamiento	22.26	15.4	6.86	16.2	6.06
Giro de motor (A-1x)	56.4	58.3	1.9	57.5	1.1
Frecuencia de giro de rodamientos (BSF)	115.3	116.7	1.4	117.3	2
2X Defecto BSF	230.6	233.4	2.8	229.5	1.1
Paso de alabes (BPF)	350	350.1	0.1	351.8	1.8
4X Defecto BSF	469.2	469	0.2	468.9	0.3

La Tabla 37, muestra la discusión de resultados de la evaluación comparación entre las señales de vibración y video de la bomba centrífuga en condiciones normales obtenidas con Matlab y DragónVisión®.

**Tabla 37.** Evaluación comparativa de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga en condiciones normales.

	<b>Observaciones</b>	<b>DragónVisión®</b>	<b>ACC</b>	<b>Diferencias</b>
1	Se aprecia la señal FFT obtenida con AAC	-	SI	
2	Se aprecia la señal FFT obtenida en DragónVisión®	SI	-	
3	Incremento o decremento en frecuencia de las frecuencias características	SI	SI	La variación en el valor de las frecuencias de la una con respecto a la otra no supera en la mayoría de las frecuencias los 2 Hz, en el caso de la FFT de la jaula del rodamiento en ambos casos existe una variación de 6 Hz lo que nos da un indicio de que el valor calculado puede ser erróneo.
4	Se identifica de manera fácil la frecuencia característica de elementos	SI	SI	Se identifica los picos de las frecuencias características, aunque no coincide con el valor exacto al calculado en la línea base.
5	Presencia de bandas laterales	NO	SI	En la gráfica FFT del software DragónVisión® no existe la presencia de bandas laterales en ningún pico, a diferencia en la gráfica obtenida con ACC. se observa la presencia de bandas laterales en frecuencias superiores a los 100 Hz.
6	Presencia de armónicos	SI	SI	En ambas gráficas se observa la presencia de los armónicos, su frecuencia no es exactamente la misma, pero cumple la relación de estar en el orden de "1x" en cada caso.

### 4.3.2 Fallo de cavitación

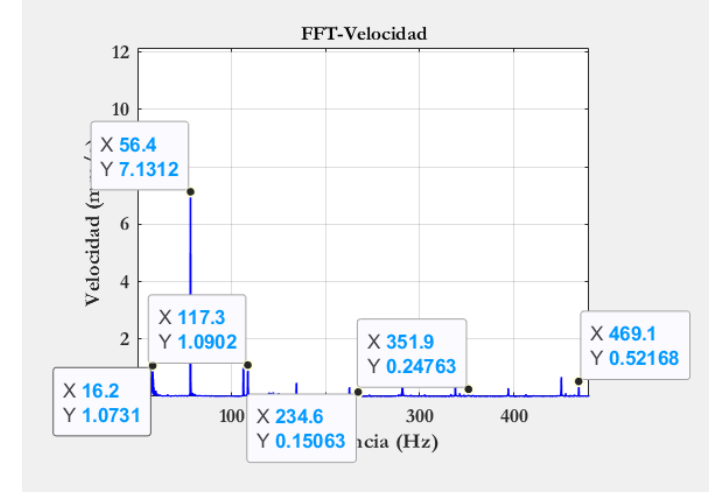
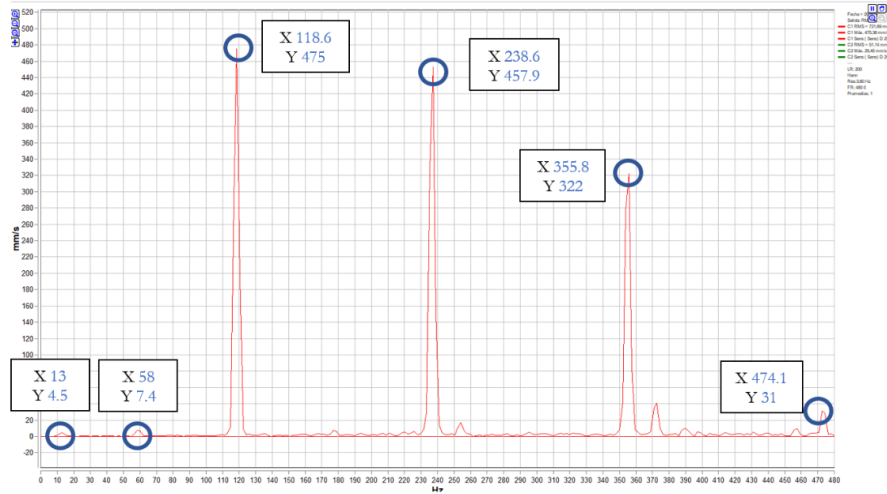
**Tabla 38.** Señales de vibración y video de bomba centrífuga multietapa con fallo de cavitación.

#### EVALUACIÓN DE SEÑALES OBTENIDAS EN BOMBA CENTRÍFUGA MULTIETAPA VERTICAL MODELO 3SV10GE4F20



<b>Condición:</b>	Cavitación	<b>Fps:</b>	960
<b>Angulo de toma de video:</b>	Eje X	<b>Resolución:</b>	HD
<b>Señal:</b>	Dominio de la frecuencia	<b>Frecuencia de línea:</b>	60 Hz
<b>Luxómetro:</b>	≈ 1650 Lux	<b>Calibración DragónVisión®:</b>	Distancia
<b>Temperatura:</b>	19.2 °C	<b>Teléfono:</b>	Samsung Galaxy +S20
<b>Humedad:</b>	61.20%	<b>Tiempo de adquisición de video:</b>	3 segundos
<b>Tiempo de adquisición de ACC:</b>	10 segundos	<b>Punto de análisis:</b>	P71: 599789





En la Tabla 39, se presenta las frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de cavitación que van a ser comparadas entre la calculadas y las obtenidas con Matlab y DragónVisión® comprobando el incremento o decremento de frecuencias y/o amplitud con respecto a la línea base.

**Tabla 39.** Frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de cavitación.

Elementos	Frecuencia (Hz)	DragónVisión®	Diferencia Calculada- DragónVisión®	ACC X	Diferencia Calculada- ACC X
FTF de la jaula rodamiento	22.26	13	9.26	16.2	6.06
Giro de motor (A-1x)	56.4	58	1.60	56.4	0.00
Frecuencia de giro de rodamientos (BSF)	115.3	118.6	3.30	117.3	2.00
2X Defecto BSF	230.6	238.6	8.00	234.6	4.00
Paso de alabes (BPF)	350	355.8	5.80	351.9	1.90
4X Defecto BSF	469.2	474.1	4.90	469.1	0.10

La Tabla 40, muestra la discusión de resultados de la evaluación comparación entre las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de cavitación obtenidas con Matlab y DragónVisión®.

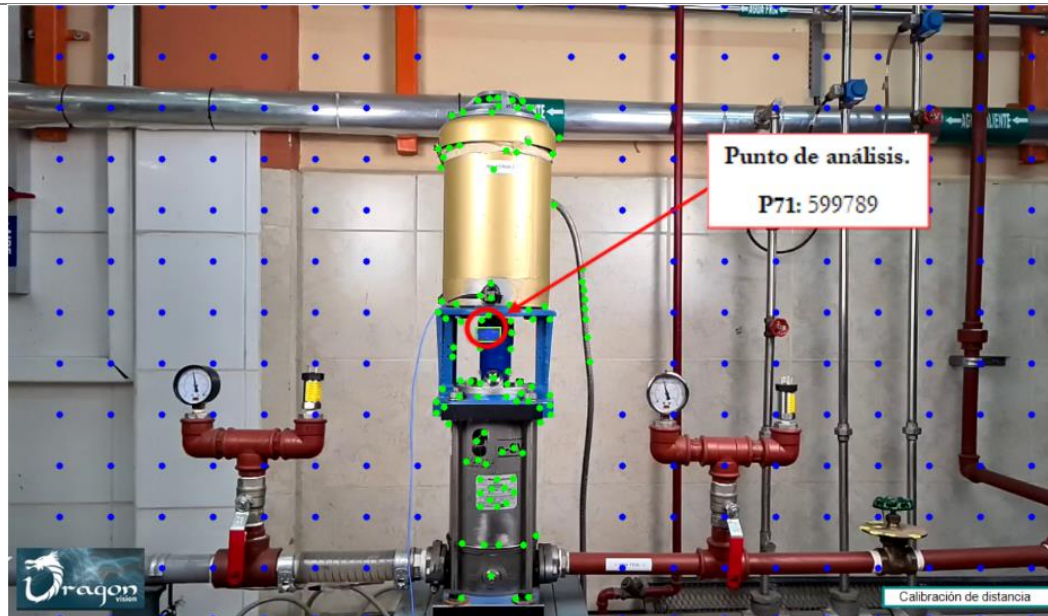
**Tabla 40.** Evaluación comparativa de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de cavitación.

	<b>Observaciones</b>	<b>DragónVisión®</b>	<b>ACC</b>	<b>Diferencias</b>
<b>1</b>	Se aprecia la señal FFT obtenida con AAC	-	SI	
<b>2</b>	Se aprecia la señal FFT obtenida en DragónVisión®	SI	-	
<b>3</b>	Incremento o decremento en de las frecuencias características	SI	SI	Se observa un aumento significativo en las diferencias entre las frecuencias calculadas y DragónVisión® que ahora todas son mayores a 1Hz con un máximo de 9.26 Hz, de igual forma en la diferencia entre las frecuencias calculadas y acelerometro se puede ver un aumento pero no tan elevado lo que nos da un indicio de que el fallo de cavitacion afecta a todas las frecuencias características aunque no sea visible en nuestro caso debido a la limitante de visualización de frecuencias altas en el software DragónVisión® ya que este fallo es visible por arriba de 2000 Hz.
<b>4</b>	Se identifica de manera fácil la frecuencia característica de elementos	SI	SI	Se identifica los picos de las frecuencias características, aunque no coincide con el valor exacto al calculado en la línea base.
<b>5</b>	Presencia de bandas laterales	SI	SI	En la gráfica FFT del software DragónVisión® existe la presencia de bandas laterales a partir de los 22 Hz, a diferencia en la gráfica obtenida con ACC. se observa la presencia de bandas laterales en frecuencias superiores a los 100 Hz.
<b>6</b>	Presencia de armónicos	SI	SI	En ambas graficas se observa la presencia de los armónicos, su frecuencia no es exactamente la misma, pero cumple la relación de estar en el orden de “1x” en cada caso.

### 4.3.3 Desbalanceo leve.

**Tabla 41.** Señales de vibración y video de bomba centrífuga multietapa con fallo de desbalanceo leve.

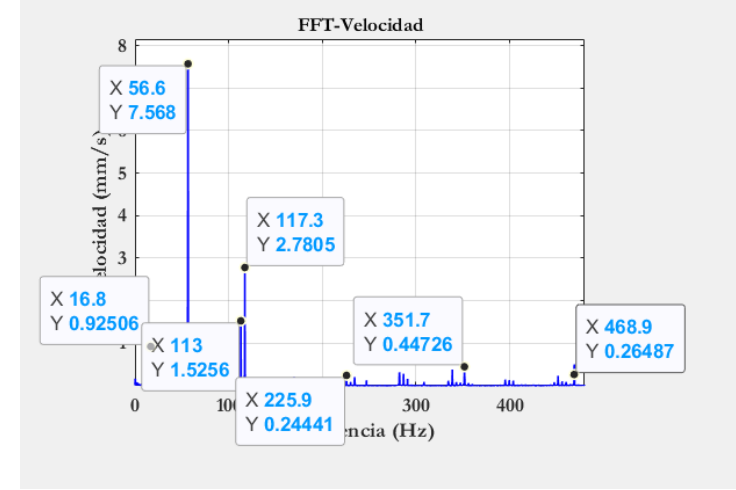
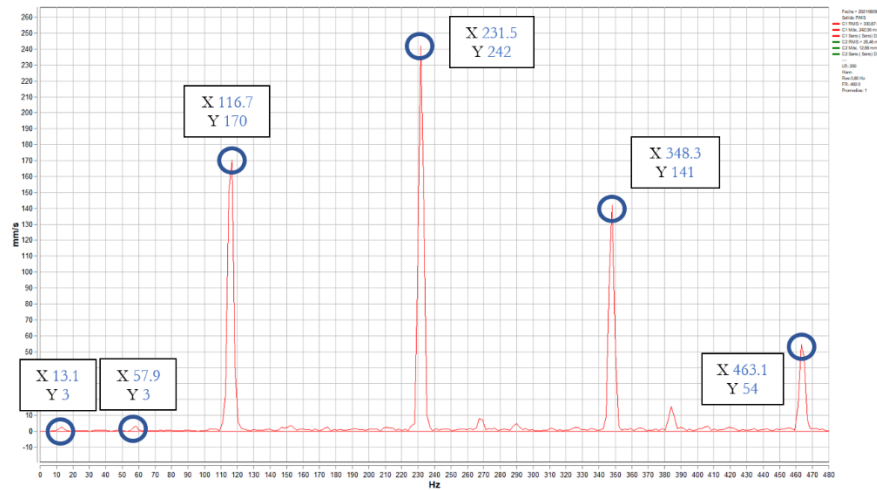
#### EVALUACIÓN DE SEÑALES OBTENIDAS EN BOMBA CENTRÍFUGA MULTIE TAPA VERTICAL MODELO 3SV10GE4F20



<b>Condición:</b>	Desbalanceo leve	<b>Fps:</b>	960
<b>Angulo de toma de video:</b>	Eje X	<b>Resolución:</b>	HD
<b>Señal:</b>	Dominio de la frecuencia	<b>Frecuencia de línea:</b>	60 Hz
<b>Luxómetro:</b>	≈ 1650 Lux	<b>Calibración DragónVisión®:</b>	Distancia
<b>Temperatura:</b>	19.2 °C	<b>Teléfono:</b>	Samsung Galaxy +S20
<b>Humedad:</b>	61.20%	<b>Tiempo de adquisición de video:</b>	3 segundos
<b>Tiempo de adquisición de ACC:</b>	10 segundos	<b>Punto de análisis:</b>	P71: 599789

DragónVisión®

Matlab



En la Tabla 42, se presenta las frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo leve que van a ser comparadas entre la calculadas y las obtenidas con Matlab y DragónVisión® comprobando el incremento o decremento de frecuencias y/o amplitud con respecto a la línea base.

**Tabla 42.** Frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo leve.

Elementos	Frecuencia (Hz)	DragónVisión®	Diferencia	
			Calculada- DragónVisión®	ACC X
FTF de la jaula rodamiento	22.26	13.1	9.16	5.46
Giro de motor (A-1x)	56.4	57.9	1.50	0.20
Frecuencia de giro de rodamientos (BSF)	115.3	116.7	1.40	2.00
2X Defecto BSF	230.6	231.5	0.90	4.70
Paso de alabes (BPF)	350	348.3	1.70	1.70
4X Defecto BSF	469.2	463.1	6.10	0.30

La Tabla 43, muestra la discusión de resultados de la evaluación comparación entre las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo leve obtenidas con Matlab y DragónVisión®.

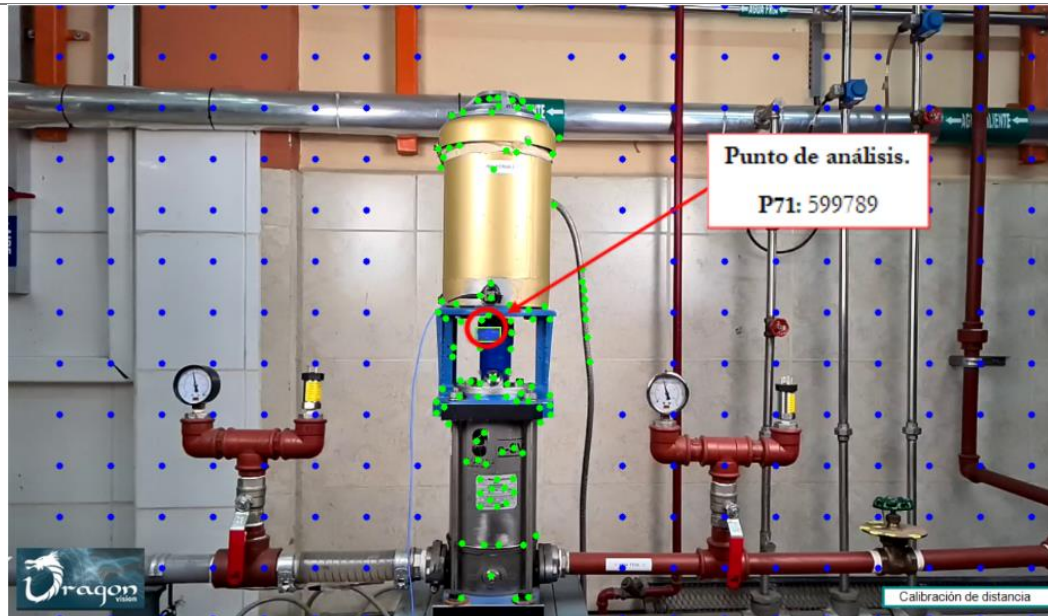
**Tabla 43.** Evaluación comparativa de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo leve.

	<b>Observaciones</b>	<b>DragónVisión®</b>	<b>ACC</b>	<b>Diferencias</b>
<b>1</b>	Se aprecia la señal FFT obtenida con AAC	-	SI	
<b>2</b>	Se aprecia la señal FFT obtenida en DragónVisión®	SI	-	
<b>3</b>	Incremento o decremento en frecuencia de las frecuencias características	SI	SI	Los valores de diferencia de las frecuencias calculadas y DragónVisión® son muy bajos que no superan los 1,7 Hz excepto la FTF de la jaula rodamiento y 4X Defecto BSF los cuales tienen 9,16 Hz y 6.10 Hz de diferencia respectivamente. En el caso de la comparación entre las frecuencias calculadas y del acelerometro no superan los 5.4 Hz
<b>4</b>	Se identifica de manera fácil la frecuencia característica de elementos	SI	SI	Se identifica los picos de las frecuencias características, aunque no coincide con el valor exacto al calculado en la línea base.
<b>5</b>	Presencia de bandas laterales	NO	SI	En la gráfica FFT del software DragónVisión® no existe la presencia de bandas laterales en ningún pico, a diferencia en la gráfica obtenida con ACC. se observa la presencia de bandas laterales en frecuencias superiores a los 100 Hz.
<b>6</b>	Presencia de armónicos	SI	SI	En ambas graficas se observa la presencia de los armónicos, su frecuencia no es exactamente la misma, pero cumple la relación de estar en el orden de “1x” en cada caso.

#### 4.3.4 Desbalanceo moderado.

**Tabla 44.** Señales de vibración y video de bomba centrífuga multietapa con fallo de desbalanceo moderado.

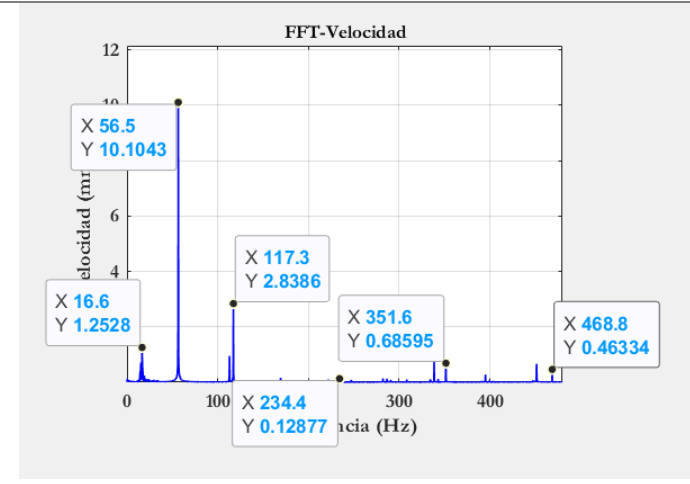
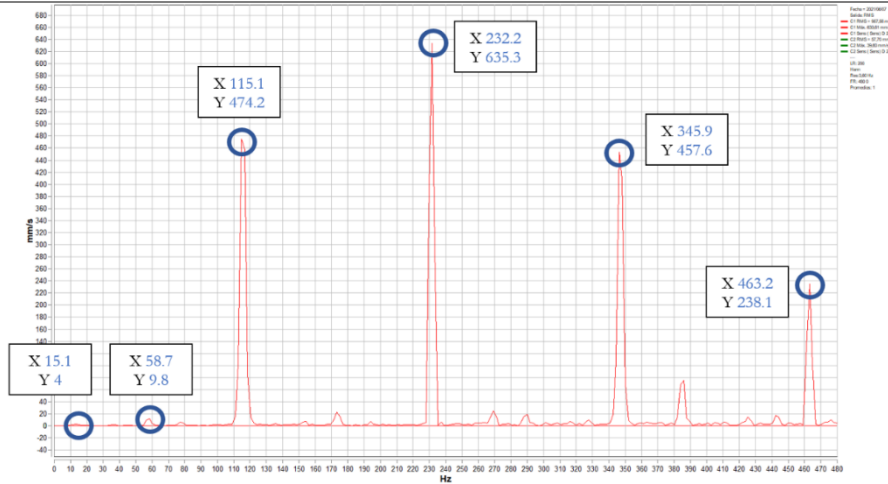
#### EVALUACIÓN DE SEÑALES OBTENIDAS EN BOMBA CENTRÍFUGA MULTIE TAPA VERTICAL MODELO 3SV10GE4F20



<b>Condición:</b>	Desbalanceo moderado	<b>Fps:</b>	960
<b>Angulo de toma de video:</b>	Eje X	<b>Resolución:</b>	HD
<b>Señal:</b>	Dominio de la frecuencia	<b>Frecuencia de línea:</b>	60 Hz
<b>Luxómetro:</b>	≈ 1650 Lux	<b>Calibración DragónVisión@:</b>	Distancia
<b>Temperatura:</b>	19.2 °C	<b>Teléfono:</b>	Samsung Galaxy +S20
<b>Humedad:</b>	61.20%	<b>Tiempo de adquisición de video:</b>	3 segundos
<b>Tiempo de adquisición de ACC:</b>	10 segundos	<b>Punto de análisis:</b>	P71: 599789

DragónVisión®

Matlab



En la Tabla 45, se presenta las frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo moderado que van a ser comparadas entre la calculadas y las obtenidas con Matlab y DragónVisión® comprobando el incremento o decremento de frecuencias y/o amplitud con respecto a la línea base.

**Tabla 45.** Frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo moderado.

Elementos	Frecuencia (Hz)	DragónVisión®	Diferencia		ACC X	Diferencia	
			Calculada-	DragónVisión®		Calculada-	ACC X
F1F de la jaula rodamiento	22.26	15.1		7.16	16.6		5.66
Giro de motor (A-1x)	56.4	58.7		2.30	56.5		0.10
Frecuencia de giro de rodamientos (BSF)	115.3	115.1		0.20	117.3		2.00
2X Defecto BSF	230.6	232.2		1.60	234.4		3.80
Paso de alabes (BPF)	350	354.9		4.90	351.6		1.60
4X Defecto BSF	469.2	463.2		6.00	468.8		0.40

La Tabla 46, muestra la discusión de resultados de la evaluación comparación entre las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo moderado obtenidas con Matlab y DragónVisión®.

**Tabla 46.** Evaluación comparativa de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo moderado.

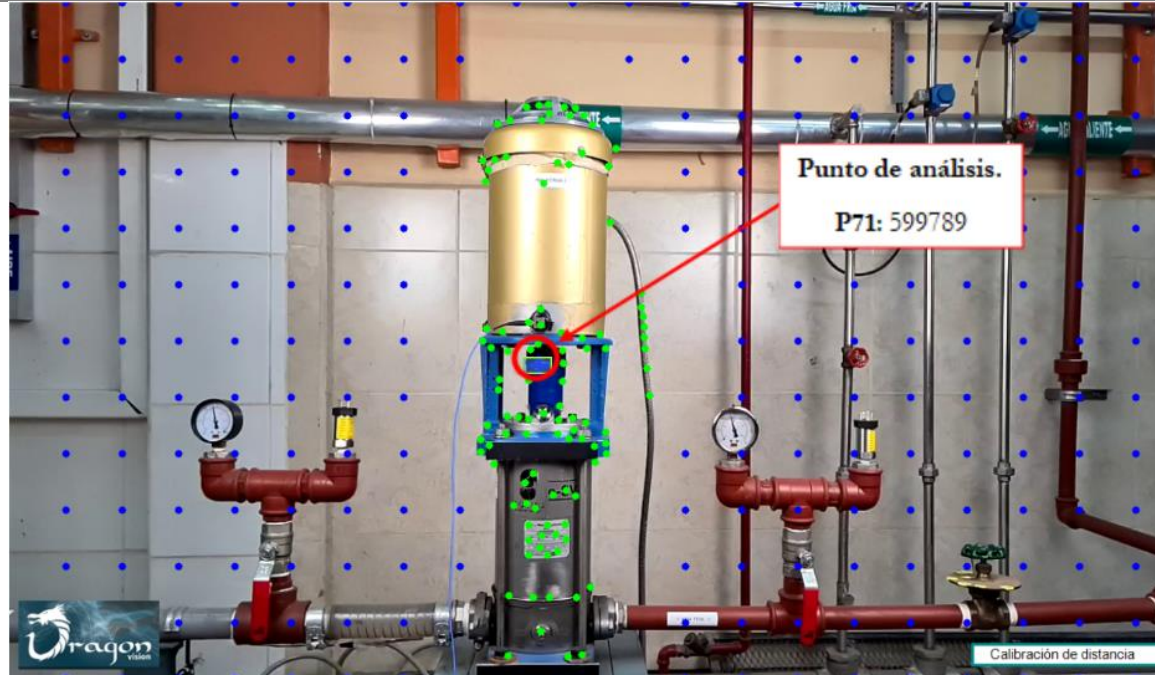
	<b>Observaciones</b>	<b>DragónVisión®</b>	<b>ACC</b>	<b>Diferencias</b>
<b>1</b>	Se aprecia la señal FFT obtenida con AAC	-	SI	
<b>2</b>	Se aprecia la señal FFT obtenida en DragónVisión®	SI	-	
<b>3</b>	Incremento o decremento en frecuencia de las frecuencias características	SI	SI	Se observa que al aumentar la severidad del fallo de desbalanceo el valor adquirido con DragónVisión® de la frecuencia paso de alabes (BPF) aumento alrededor de 200%.
<b>4</b>	Se identifica de manera fácil la frecuencia característica de elementos	SI	SI	Se identifica los picos de las frecuencias características, aunque no coincide con el valor exacto al calculado en la línea base.
<b>5</b>	Presencia de bandas laterales	NO	SI	En la gráfica FFT del software DragónVisión® no existe la presencia de bandas laterales en ningún pico, a diferencia en la gráfica obtenida con ACC. se observa la presencia de bandas laterales en frecuencias superiores a los 100 Hz.
<b>6</b>	Presencia de armónicos	SI	SI	En ambas graficas se observa la presencia de los armónicos, su frecuencia no es exactamente la misma, pero cumple la relación de estar en el orden de “1x” en cada caso.



4.3.5 Desbalanceo severo.

**Tabla 47.** Señales de vibración y video de bomba centrífuga multietapa con fallo de desbalanceo severo.

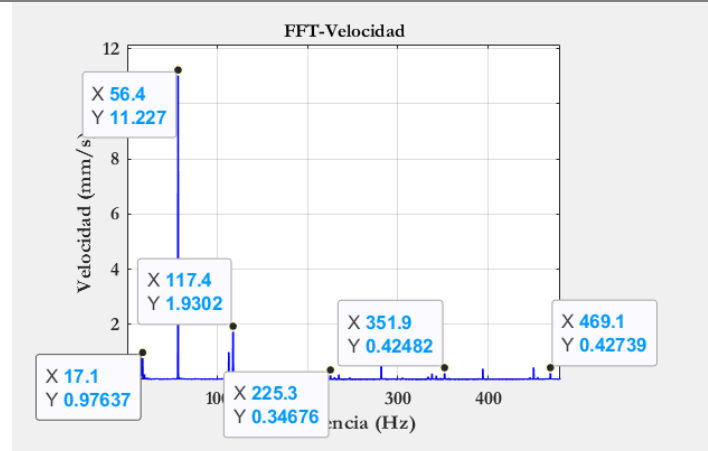
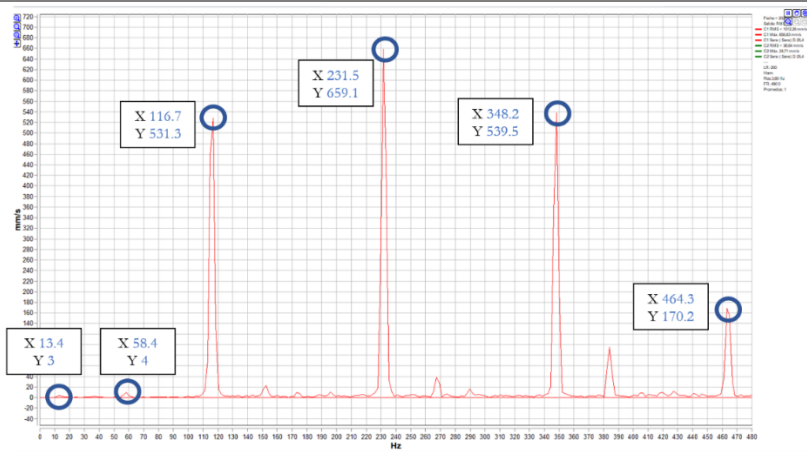
**EVALUACIÓN DE SEÑALES OBTENIDAS EN BOMBA CENTRÍFUGA MULTIETAPA VERTICAL MODELO 3SV10GE4F20**



<b>Condición:</b>	Desbalanceo severo	<b>Fps:</b>	960
<b>Angulo de toma de video:</b>	Eje X	<b>Resolución:</b>	HD
<b>Señal:</b>	Dominio de la frecuencia	<b>Frecuencia de línea:</b>	60 Hz
<b>Luxómetro:</b>	≈ 1650 Lux	<b>Calibración DragónVisión®:</b>	Distancia
<b>Temperatura:</b>	19.2 °C	<b>Teléfono:</b>	Samsung Galaxy S20+
<b>Humedad:</b>	61.20%	<b>Tiempo de adquisición de video:</b>	1 segundo súper cámara lenta = 32 segundos
<b>Tiempo de adquisición de ACC:</b>	10 segundos	<b>Punto de análisis:</b>	P71: 599789

**DragónVisión®**

**Matlab**



En la Tabla 48, se presenta las frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo severo que van a ser comparadas entre la calculadas y las obtenidas con Matlab y DragónVisión® comprobando el incremento o decremento de frecuencias y/o amplitud con respecto a la línea base.

**Tabla 48.** Frecuencias características de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo severo.

Elementos	Frecuencia (Hz)	DragónVisión®	Diferencia Calculada- DragónVisión®	ACC X	Diferencia Calculada- ACC X
FTF de la jaula rodamiento	22.26	13.4	8.86	16.8	5.46
Giro de motor (A-1x)	56.4	58.4	2.00	56.6	0.20
Frecuencia de giro de rodamientos (BSF)	115.3	116.7	1.40	117.3	2.00
2X Defecto BSF	230.6	231.5	0.90	225.9	4.70
Paso de alabes (BPF)	350	358.2	8.20	351.7	1.70
4X Defecto BSF	469.2	464.3	4.90	468.9	0.30

La Tabla 49, muestra la discusión de resultados de la evaluación comparativa entre las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo severo obtenidas con Matlab y DragónVisión®.

**Tabla 49.** Evaluación comparativa de las señales de vibración y video de la bomba centrífuga con fallo de desbalanceo severo.

	<b>Observaciones</b>	<b>DragónVisión®</b>	<b>ACC</b>	<b>Diferencias</b>
<b>1</b>	Se aprecia la señal FFT obtenida con AAC	-	SI	
<b>2</b>	Se aprecia la señal FFT obtenida en DragónVisión®	SI	-	
<b>3</b>	Incremento o decremento en frecuencia de las frecuencias características	SI	SI	Se observa que al aumentar la severidad del fallo de desbalanceo el valor adquirido con DragónVisión® de la frecuencia paso de alabes (BPF) aumento alrededor de 800%.
<b>4</b>	Se identifica de manera fácil la frecuencia característica de elementos	SI	SI	Se identifica los picos de las frecuencias características, aunque no coincide con el valor exacto al calculado en la línea base.
<b>5</b>	Presencia de bandas laterales	NO	SI	En la gráfica FFT del software DragónVisión® no existe la presencia de bandas laterales en ningún pico, a diferencia en la gráfica obtenida con ACC. se observa la presencia de bandas laterales en frecuencias superiores a los 100 Hz.
<b>6</b>	Presencia de armónicos	SI	SI	En ambas graficas se observa la presencia de los armónicos, su frecuencia no es exactamente la misma, pero cumple la relación de estar en el orden de “1x” en cada caso.

#### 4.4 Resumen de resultados.

En esta sección se presenta de manera resumida los resultados de las evaluaciones comparativas de las señales de vibración y video en bomba centrífuga multietapa de eje vertical en condiciones normales y con fallo de cavitación y desbalanceo con sus diferentes severidades (leve, moderado y severo) como se muestra en la Tabla 50.

Como se aprecia en la tabla no se tomó en cuenta para la evaluación el valor de las amplitudes en ninguno de los casos debido a que los datos de amplitud adquiridos con DragónVisión® son erróneos dado que este software basa sus medidas en desplazamiento a diferencia que el acelerómetro se basa en la aceleración.

El correcto anclaje y amortiguamiento del sistema de bombeo permite que las señales adquiridas tengan un bajo nivel de ruido, por lo tanto, facilita identificar las frecuencias características.

El espectro característico de fallo de cavitación no es visible en el rango de frecuencias que se puede acceder por la limitante de nuestro equipo, para la visualización de dicho fallo se necesita un equipo de grabación con una calidad superior a los 4000 FPS.

**Tabla 50.** Resumen de resultados de las evaluaciones comparativas de las señales de vibración y video.

<b>Condiciones normales</b>					
Elementos	Frecuencia (Hz)	DragónVisión®	Diferencia Calculada- DragónVisión®	ACC X	Diferencia Calculada- ACC X
FTF de la jaula rodamiento	22.26	15.4	6.86	16.2	6.06
Giro de motor ( $\Lambda$ -1x)	56.4	58.3	1.9	57.5	1.1
Frecuencia de giro de rodamientos (BSF)	115.3	116.7	1.4	117.3	2
2X Defecto BSF	230.6	233.4	2.8	229.5	1.1
Paso de alabes (BPF)	350	350.1	0.1	351.8	1.8
4X Defecto BSF	469.2	469	0.2	468.9	0.3
<b>Fallo de cavitacion</b>					
Elementos	Frecuencia (Hz)	DragónVisión®	Diferencia Calculada- DragónVisión®	ACC X	Diferencia Calculada- ACC X
FTF de la jaula rodamiento	22.26	13	9.26	16.2	6.06
Giro de motor ( $\Lambda$ -1x)	56.4	58	1.60	56.4	0.00
Frecuencia de giro de rodamientos (BSF)	115.3	118.6	3.30	117.3	2.00
2X Defecto BSF	230.6	238.6	8.00	234.6	4.00
Paso de alabes (BPF)	350	355.8	5.80	351.9	1.90
4X Defecto BSF	469.2	474.1	4.90	469.1	0.10
<b>Desbalanceo Leve</b>					
Elementos	Frecuencia (Hz)	DragónVisión®	Diferencia Calculada- DragónVisión®	ACC X	Diferencia Calculada- ACC X
FTF de la jaula rodamiento	22.26	13.1	9.16	16.8	5.46
Giro de motor ( $\Lambda$ -1x)	56.4	57.9	1.50	56.6	0.20
Frecuencia de giro de rodamientos (BSF)	115.3	116.7	1.40	117.3	2.00
2X Defecto BSF	230.6	231.5	0.90	225.9	4.70
Paso de alabes (BPF)	350	348.3	1.70	351.7	1.70
4X Defecto BSF	469.2	463.1	6.10	468.9	0.30
<b>Desbalanceo Moderado</b>					
Elementos	Frecuencia (Hz)	DragónVisión®	Diferencia Calculada- DragónVisión®	ACC X	Diferencia Calculada- ACC X
FTF de la jaula rodamiento	22.26	15.1	7.16	16.6	5.66

Giro de motor (A-1x)	56.4	58.7	2.30	56.5	0.10
Frecuencia de giro de rodamientos (BSF)	115.3	115.1	0.20	117.3	2.00
2X Defecto BSF	230.6	232.2	1.60	234.4	3.80
Paso de alabes (BPF)	350	354.9	4.90	351.6	1.60
4X Defecto BSF	469.2	463.2	6.00	468.8	0.40

**Desbalanceo Severo**

Elementos	Frecuencia (Hz)	DragónVisión®	Diferencia Calculada- DragónVisión®	ACC X	Diferencia Calculada- ACC X
F <sup>1</sup> TF de la jaula rodamiento	22.26	13.4	8.86	16.8	5.46
Giro de motor (A-1x)	56.4	58.4	2.00	56.6	0.20
Frecuencia de giro de rodamientos (BSF)	115.3	116.7	1.40	117.3	2.00
2X Defecto BSF	230.6	231.5	0.90	225.9	4.70
Paso de alabes (BPF)	350	358.2	8.20	351.7	1.70
4X Defecto BSF	469.2	464.3	4.90	468.9	0.30

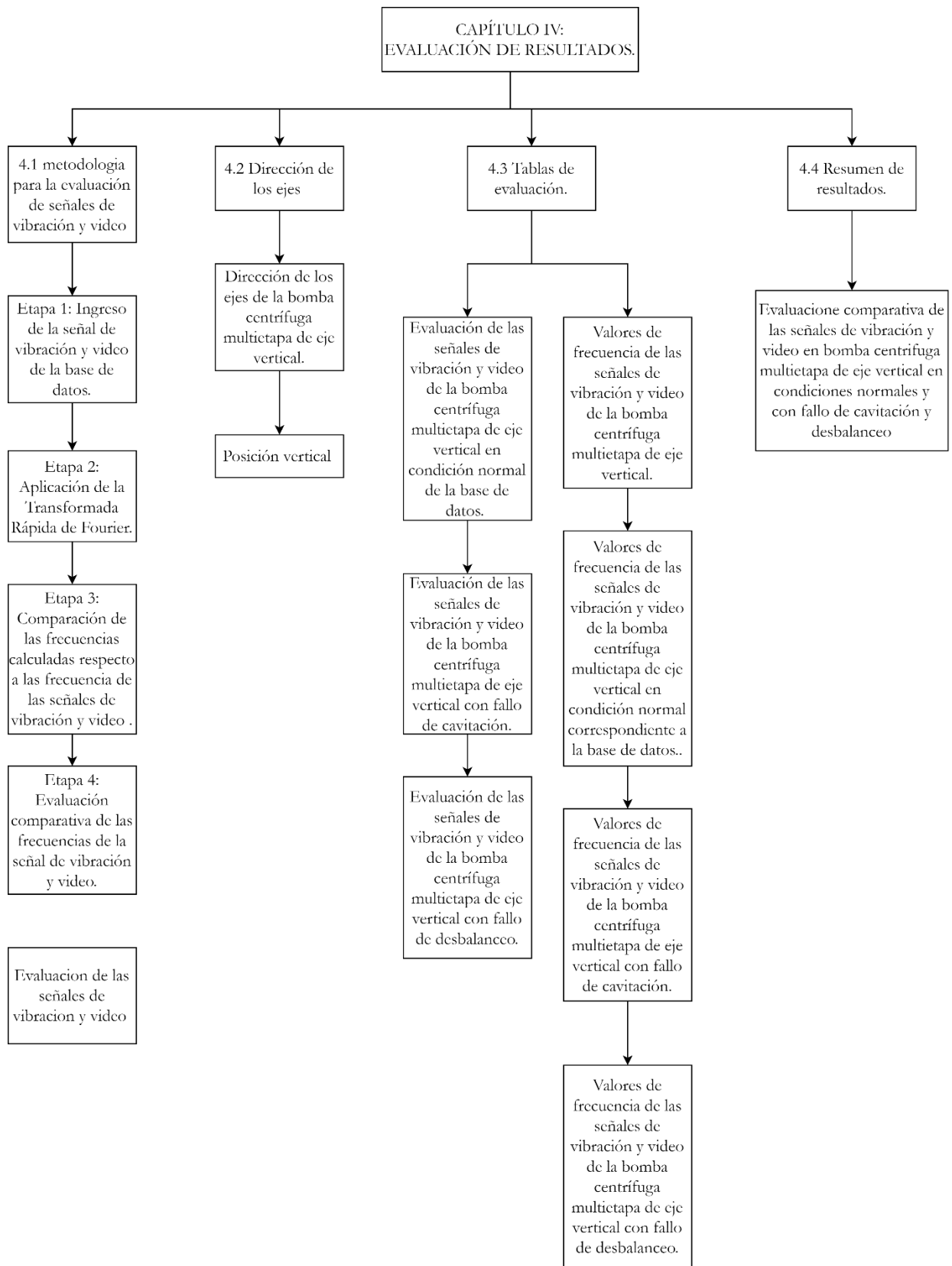


Figura 56. Resumen capítulo 4.

## 5 DISCUSION

El monitoreo de la condición mediante señales de video aplicado a maquinaria rotativa y estructuras se ha convertido en un tema de tecnología emergente, puesto que, es una técnica no invasiva y permite el monitoreo en tiempo real de la maquinaria. Según Roig Hernández, en el trabajo titulado: “Medidas y análisis de movimientos y vibraciones mediante sistemas de bajo coste basados en visión artificial”, emplea la técnica de seguimiento mediante la detección de una elipse para el análisis de desplazamiento en una columna de acero con gran exactitud [48]. Por otra parte, Justin G. Chen Neal Wadhwa Young-Jin Cha Frédo Durand William T. Freeman OralBuyukozturk, presenta el trabajo titulado: “Identificación modal de estructuras simples con video de alta velocidad usando aumento de movimiento”, el mismo que se basa en el estudio de cámaras de video que cuentan con la capacidad única de recopilar datos espaciales de alta densidad en una escena de interés distante. El video de alta velocidad puede emplearse como sensores de inspección o monitoreo remoto para estructuras debido a su disponibilidad común, simplicidad y costo potencialmente bajo [49].

Dashan Zhang , Jie Guo , Xiujun Lei y Changan Zhu, presenta un estudio utilizando el desarrollo del sensor de imagen y la óptica, mediante la aplicación de técnicas basadas en la visión al análisis de vibraciones dinámicas sin contacto de estructuras a gran escala, para la extracción de señales de vibración de la estructura en tiempo real, el cual requiere de un algoritmo de extracción de movimiento rápido para este sistema puesto que, la frecuencia máxima de muestreo del sensor del dispositivo de carga acoplada puede alcanzar hasta 1000 Hz, en su trabajo denominado: “A High-Speed Vision-Based Sensor for Dynamic Vibration Analysis Using Fast Motion Extraction Algorithms” [50].

Basado en los trabajos anteriormente mencionados, en el presente estudio se plantea la aplicación de la técnica espejo para el monitoreo de condición, empleando señales de video con el propósito de detectar fallos en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical modelo 3SV10GE4F20, el mismo consiste en grabar un video de la bomba en funcionamiento con ciertas características mínimas como es el patrón de referencia, la velocidad de fotogramas de la cámara de video y por último el punto de análisis donde se va a realizar el estudio y posteriormente procesar el video en el software denominado “DragónVisión®”, el mismo trabaja la técnica espejo que se encarga de rastrear micro movimientos en el video, para luego convertirlos en señales de vibración en el dominio de tiempo y frecuencia.

El trabajo fue realizado con dos metodologías: una de adquisición con el fin de obtener base de datos de la bomba centrífuga aplicando dos fallos cavitación y desbalanceo los cuales se aplicaron en 3 diferentes severidades moderado y severo; y otra de evaluación de las señales de vibración obtenidas con video con las obtenidas con acelerómetro triaxial, logrando así conseguir resultados, donde se aprecian valores directamente proporcionales a los FPS del equipo de grabación.

El punto 4.2 de resumen de resultados, se alcanzó a observar valores de frecuencias muy parecidos, sin embargo, en cuanto a los valores de amplitud obtenidos no concuerdan debido a que el principio de obtención de datos del software DragónVisión®, basa su procesamiento de señales acorde al desplazamiento, a diferencia del acelerómetro triaxial involucra el procesamiento en aceleración. Los datos obtenidos por el DragónVisión®, pueden ser optimizados con equipos de mayor resolución y con cámaras de video que cuenten con una mayor cantidad de fotogramas (FPS).

## **6 CONCLUSIONES**

Se ha evaluado las señales de video empleando la técnica espejo con el uso de DragónVisión® para la detección de fallos de cavitación y desbalanceo en la bomba centrífuga multietapa de eje vertical modelo 3SV10GE4F20.

Se estableció una metodología para detección de fallos de cavitación y desbalanceo en bombas centrífugas multietapa de eje vertical mediante la técnica espejo en el procesamiento de señales de video con el uso del software DragónVisión® mediante de la simulación de fallos de cavitación y desbalanceo en niveles de severidad (leve, moderado y severo) con base en funcionamiento y requerimientos del software de procesamiento de señales de video y vibración tales como: acondicionamiento del entorno y parámetros de operación de la bomba centrífuga multietapa de eje vertical y características de los equipos de adquisición de datos .

Adicionalmente se consideró obtener la línea base en condiciones normales de operación en el punto de máxima eficiencia para luego ser comparada experimentalmente donde dependiendo de la severidad y tipo de fallo tiende a generar cambios.

Se implemento y evaluó la metodología para la detección de fallo de cavitación y desbalanceo en bombas centrífugas multietapa de eje vertical mediante la técnica espejo en el procesamiento de las señales de video con el uso del software DragónVisión®.

Con la evaluación realizada se puede concluir que el software DragónVisión® solo puede ser aplicado para la detección de fallos de frecuencias bajas, ya que esta es directamente proporcional a los FPS del equipo de adquisición de video.

## **7 RECOMENDACIONES**

Se recomienda establecer una guía de mantenimiento de la bomba con lineamientos para el montaje de elementos mecánicos, orden de ensamblaje, mantenimiento de los depósitos de agua y filtros en el sistema, control del pH en el agua, torque de apriete de tornillos con el fin de garantizar la reproducibilidad entre pruebas y de esta forma optimizar el tiempo de montaje y desmontaje de elementos con fallo con el propósito de reducir el tiempo de adquisición de bases de datos en trabajos futuros.

Adquirir un equipo de grabación profesional para poder realizar una evaluación de señales de vibración y video de fallos a frecuencias altas.

## **8 TRABAJOS FUTUROS**

Próximamente en trabajos futuros, realizar la evaluación de señales de vibración y video de otros fallos que se presenten en las bombas centrífugas multietapa de eje vertical y aumentando el número de severidades ya que de esta manera se logrará tener más experticia a la hora de aplicar la técnica espejo con el uso de DragónVisión® para la detección de fallos en bombas centrífugas multietapa de eje vertical.



## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. K. Jardine, D. Lin, y D. Banjevic, *A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance*, 7.<sup>a</sup> ed., vol. 20. Mech. Syst. Signal Process., 2006.
- [2] R. V. Sánchez Loja, «Diagnóstico de fallos en engranajes basado en el análisis de señales de vibración empleando una red neuronal perceptrón multicapa con retropropagación del error», Tesis de Máster, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2012.
- [3] J. C. Calderón Malla y F. I. Montalván Pulla, «Adquisición de señales acústicas y vibratorias para el diagnóstico de fallos en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2019.
- [4] M. R. Carangui Vintimilla, «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», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2014.
- [5] S. S. Rao, *Vibration of continuous systems*. John Wiley & Sons, 2007.
- [6] M. O. Aros Callejas, «Medición de vibraciones ambientales en edificios utilizando cámaras de video económicas sin intervención en la estructura», Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 2017.
- [7] Ma. B. Muñoz Abella, «Mantenimiento industrial», Universidad Carlos III, Madrid Área de Ingeniería Mecánica.
- [8] K. Berli Paripurna, «Vibration-based multi-fault diagnosis for centrifugal pumps.», Ph.D., Curtin University Department of Mechanical Engineering, 2015.
- [9] J. H. Ruiz Rodriguez, «Monitoreo de condición», Sielcom S. A. S., Bucaramanga Colombia, 2019.
- [10] R. Ambur y S. Rinderknecht, *Unbalance detection in rotor systems with active bearings using self-sensing piezoelectric actuators*, vol. 102. 2018.
- [11] Vibratec S.A., *Mantenimiento predictivo, análisis de vibraciones, monitores de vibración y balanceo dinámico*. Ecuador, 2019. [En línea]. Disponible en: [http://www.vibratec.net/pages/tecnico\\_desbalance.html](http://www.vibratec.net/pages/tecnico_desbalance.html)
- [12] L. C. Cheuquela Barriga, «Protocolo para el balanceo dinámico de un ventilador con analizador de vibraciones detector III», Universidad Austral, Chile.
- [13] M. Hutterer, G. Kalteis, y M. Schrödl, *Redundant unbalance compensation of an active magnetic bearing system*, vol. 94. 2017.
- [14] A. Guzman Hincapie, «Introducción al análisis de vibraciones», Ing. Mecánico, A-MAQ Vibration Institute Category III, 2020. [En línea]. Disponible en: [www.a-maq.com](http://www.a-maq.com)
- [15] I. N. Tegrantes, D. Ocente, y S. E. Mestre, «Costos de mantenimiento», p. 16.
- [16] S. A. Alvarez Tatis, «Estado del arte, análisis y mantenimiento de bombas centrífugas», Universidad tecnológica de bolívar, Facultad de Ingeniería Mecánica, Cartagena, 2008.
- [17] D. O. Bukowitz-kulka y J. C. Ustiola-borjas, *Equilibrado dinámico*, vol. 48. 2009.
- [18] A. O. Guerrero y U. de Sevilla, «Mantenimiento predictivo de bombas», p. 11.
- [19] S. R. P. A.-M., *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*, vol. 1. 2005.
- [20] G. White, *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Azima DLI. 300 TradeCenter, Suite 4610, Woburn, MA 01801, 2010.
- [21] G. Mosquera, «Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo», p. 205.
- [22] M. Victor Manuel, «El análisis de vibraciones en el mantenimiento predictivo», Facultad de Ing. Barcelona Universidad Nororiental Privada, 2019.
- [23] S. de las Heras, Iniciativa Digital Politécnica, y Universitat Politécnica de Catalunya, *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*. Barcelona: Iniciativa Digital Politécnica, 2011. Accedido: dic. 29, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://ebooks.upc.edu/product/fluidos-bombas-e-instalaciones-hidraulicas>
- [24] J. César Sánchez, *Bombas centrífugas*, 2.<sup>a</sup> ed., vol. 1. e.carnicer c.mainar, 2016.
- [25] J. Agüera, *Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas*, 1.<sup>a</sup> ed., vol. 1. Madrid Área de Ciencia, 1992.
- [26] E. Carnicer Royo y C. Mainar, «Bombas centrífugas», Tompson Paraninfo Madrid, 1995.

- [27] J. Cabrera y F. Gomez, *Estudio y propuestas de solución para fallos recurrentes en bombas centrífugas*, 2.<sup>a</sup> ed., vol. 13. 2010.
- [28] J. Quiroga M., S. Oviedo C., y A. García C., *Detección de cavitación en una bomba centrífuga usando emisiones acústicas*, 3.<sup>a</sup> ed., vol. 20. Chile Departamento de Ing.: Ingeniare Rev., 2012.
- [29] F. Al Thobiani, «The Non-intrusive Detection of Incipient Cavitation in Centrifugal Pumps», Doctoral, University of Huddersfield, 2011.
- [30] S. de las Heras, «Fluidos - Bombas e Instalaciones Hidráulicas», Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- [31] G. Machado, E. Albán, J. Rengifo, y A. Bueno, «Diagnóstico de cavitación en bombas centrífugas mediante técnicas espectrales no invasivas», p. 11.
- [32] B. Nesbitt, *Handbook of Pumps and Pumping: Pumping Manual International*. United Kingdom: Elsevier Science & Technology: Jordan Hill, 2006.
- [33] J. Luo y Z. Niu, *Jet and Shock Wave from Collapse of Two Cavitation Bubbles*, 1.<sup>a</sup> ed., vol. 9. 2019.
- [34] J. A. García Rodríguez, *Teoría de máquinas e instalaciones de fluidos*. Zaragoza: España: Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2013.
- [35] J. McNaughton, *Bombas Selección, uso y mantenimiento*. U.S.A: McGraw-Hill., 1988.
- [36] H. P. Bloch, *Pump Wisdom: Problem Solving for Operators and Specialists*. John Wiley & Sons, 2011.
- [37] U. Sánchez Domínguez, *UMáquinas hidráulica*. Alicante, España, 2013.
- [38] S. Al-Hashmi, F. Gu, Y. Li, A. Ball, T. Fen, y K. Lui, *Cavitation Detection of a Centrifugal Pump Using Instantaneous Angular Speed*, vol. 3. Manchester, England, 2004.
- [39] A. Cáceres y A. Andree, «Determinación predictiva de la cavitación por Parámetros Sónicos», UNSA, Arequipa, 2016.
- [40] A. Marchegiani, *Bombas centrífugas*, vol. 1. Departamento de mecánica aplicada LA.M.HI., Universidad nacional del COMAHUE, 2004.
- [41] S. A. Al-Hashmi, *Statistical Analysis of Acoustic Signal for Cavitation Detection*, 4.<sup>a</sup> ed., vol. 3. 2013.
- [42] D. E. P. Marín, «La medición y el análisis de vibraciones en el diagnóstico de máquinas rotatorias», p. 113.
- [43] L. A. Aldaz Mayorga, «Análisis espectral de señales de vibraciones mecánicas causadas por desalineación como método de mantenimiento predictivo en bombas hidráulicas centrífugas horizontales de flujo radial de 1 hp.», Tesis Pregrado, Universidad técnica de Ambato, Facultad de ingeniería Mecánica, 2015.
- [44] F. J. Espinosa Perez, *La señal de video en alta definición*, vol. 3. Editorial círculo rojo, 2014.
- [45] T. Erbesd, *Vibration Tracking The Looking Glass Technique See the Invisible*, President and Chief Innovation Officer. Erbesd Instruments, 2020.
- [46] PCB piezotronics an mts company., «Acelerómetro Triaxial: 356A15», 2009. [En línea]. Disponible en: <https://www.pcb.com/products?model=356A15>
- [47] A. J. Gonzalez Besa y J. Carballeira Morado, «Diagnóstico y corrección de fallos de componentes mecánicos.», Editorial Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, 2018.
- [48] A. Roig Hernández, «Medida y análisis de movimientos y vibraciones mediante sistemas de bajo coste basados en visión artificial.», Universidad de Alicante, Alicante, 2014.
- [49] C. Justin G., W. Neal, D. Frédo, F. William T., y B. Oral, *Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification*, vol. 345. Journal of Sound and Vibration, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X1500070X>
- [50] D. Zhang, J. Guo, X. Lei, y C. Zhu, «Un sensor basado en visión de alta velocidad para el análisis dinámico de vibraciones utilizando algoritmos de extracción de movimiento rápido.», 2016. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s16040572>