

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS PARA UNA BOMBA CENTRIFUGA

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presenta el bachiller:

Anderson Paulino Barboza Cervan

ASESOR: Juan Javier Sotomayor Moriano

Lima, febrero del 2013

RESUMEN

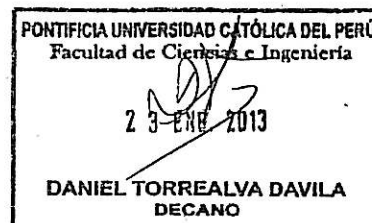
En la presente tesis se presenta el desarrollo de un Sistema de Detección de Fallas para una Bomba Centrífuga, que se basara en el método del análisis vibracional

Los trabajos realizados incluyen el estudio de funcionamiento de la bomba centrífuga, la elección del método de detección de fallas y el diseño del Sistema de Diagnostico de Fallas que permita conocer el estado diseñado en la bomba centrífuga en la Planta Intercambiador de Calor, donde se realizan las pruebas.

El sistema de Diagnostico de Fallas para la Bomba Centrífuga desarrollado, detecta de manera correcta, fallas de desalineamiento en las bombas centrífugas estudiadas.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Sistema de Detección de Fallas para una Bomba Centrífuga
Área : Control y Automatización # 1047
Asesor : Javier Sotomayor Moriano
Alumno : Anderson Paulino Barboza Cervan
Código : 20072029
Fecha : 20/11/2012



Descripción y Objetivos

En las plantas industriales modernas, los sistemas de control no solo se emplean para que estas alcancen los requerimientos de funcionamiento deseados de respuesta en el tiempo, sino también para detectar las fallas que originan su mal funcionamiento y ocasionan paradas en la producción, así como pérdida de recursos.

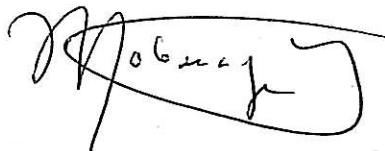
En particular, en los procesos industriales las bombas centrífugas son ampliamente empleadas debido a su principal función, la cual es mover volúmenes de líquidos entre distintos niveles. Así, la oportuna detección de fallas en estos elementos, puede evitar paradas no deseadas del proceso.

La presente tesis tiene como objetivo el diseño de un sistema de diagnóstico de fallas para una bomba centrífuga, la cual funcionará acoplada a un motor eléctrico monofásico. Este sistema de diagnóstico de fallas se basará en el método de análisis vibracional.

Los trabajos a realizar consisten en el estudio del funcionamiento de las bombas centrífugas, la elección del método de detección de fallas en bombas centrífugas y el diseño del sistema de detección de fallas que permita conocer el estado de la máquina y el lugar de ocurrencia de la falla. Finalmente, se implementará el sistema diseñado en la bomba centrífuga de un planta, donde se realizarán pruebas.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Dr. Ing. BENJAMÍN CASTAÑEDA APHAN
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Sistema de Detección de Fallas para una Bomba Centrífuga

Índice

Introducción

1. Descripción de la Planta Intercambiador de Calor y Bombas Centrífugas.
2. Metodología de Detección de Fallas en Bombas Centrífugas.
3. Diseño del Sistema de Detección de Fallas en Bombas Centrífugas.
4. Pruebas y Resultados Obtenidos.

Conclusiones

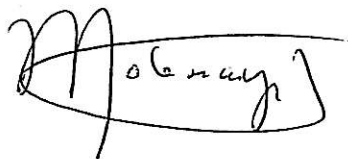
Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Dr. Ing. BENJAMÍN CASTAÑEDA APHAN
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica



Dedicatoria

Dios, por haberme dado la oportunidad de vivir para lograr mis objetivos.

Mi madre Cristina, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, por haber creído en mí, por las ganas de salir adelante y por su amor.

Mi padre Marcial, por los ejemplos de perseverancia y puntualidad que lo caracterizan y por su amor.

Mis hermanas Gaby, Erlinda y Alicia por ser el ejemplo de hermanas mayores que me apoyaron y confiaron en mí, durante mi etapa universitaria, de las cuales aprendí mucho a través de sus consejos y por su constante amor inexplicable para mi superación personal; y a mi cuñado Rafael por su apoyo.

Mis sobrinos, Diego y Marcel, para que vean en mi un ejemplo a seguir.

Gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto se lo debo a ustedes.

INDICE

INTRODUCCION	1
1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA INTERCAMBIADOR DE CALOR Y BOMBA CENTRIFUGA.....	3
1.1 Descripción de la Planta.....	3
1.2 Descripción de la Bomba Centrífuga.....	4
1.2.1 Introducción	4
1.2.2 Principio de Funcionamiento	5
1.2.3 Partes de la Bomba Centrífuga	6
1.2.4 Dimensiones y Peso de la Bomba Centrífuga.....	8
1.2.5 Curvas de Bombas Centrífugas.....	8
1.2.6 Tipos de Fallas en Bombas Centrífugas	10
1.3 Síntesis Sobre el Asunto de Estudio.....	12
2 METODOLOGIA DE DETECCION DE FALLAS EN BOMBAS CENTRIFUGAS	14
2.1 Introducción	14
2.2 Reconocimiento de la Planta.....	15
2.3 Etapa Transductor	15
2.3.1 Transductor de Desplazamiento.....	16
2.3.2 Transductor de Velocidad.....	17
2.3.3 Transductor de Aceleración.....	18
2.4 Análisis Vibracional	23
2.4.1 Fundamentos de Vibraciones.....	23
2.4.1.1 Introducción.....	23
2.4.1.2 Parámetros de la Vibración.....	24
2.4.1.3 Tipos de Vibración	26
2.4.2 Fundamentos de Transformada de Fourier.....	27
2.4.3 Análisis Espectral de Bomba Centrífuga	28
2.5 Norma de Vibración.....	32
2.6 Objetivos.....	33

3 DISEÑO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN BOMBAS CENTRIFUGAS	35
3.1 Esquema General de Detección de Fallas	35
3.2 Diseño del Sistema de Detección de Fallas	35
3.2.1 Selección del Transductor	35
3.2.2 Programa de detección de fallas	38
3.2.2.1 Introducción.....	38
3.2.2.2 Tiempo de funcionamiento del Programa.....	39
3.2.2.3 Adquisición de Datos	39
3.2.2.4 Diseño del Filtro Digital	40
3.2.2.5 Análisis de la Señal.....	43
3.2.2.6 Función de Detección de Picos y Estado de la Bomba Centrifuga	43
3.2.2.7 Muestra de Resultados	46
4 Pruebas y Resultados Obtenidos	47
4.1 Pruebas Usando un Generador de Señal.....	47
4.2 Pruebas de Funcionamiento del Acelerómetro.....	50
4.3 Pruebas en Bomba Centrifuga de planta de nivel	53
4.4 Pruebas en Bombas Centrifugas de Planta Intercambiador de Calor..	55
4.5 Análisis y Resultados Obtenidos.....	56
CONCLUSIONES	58
RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFIA.....	60

INTRODUCCION

Actualmente son muchas las empresas y universidades que tienen plantas de procesos, las cuales cuentan con bombas centrífugas, siendo estas una parte importante de la planta debido a su función: trasladar un cierto volumen de líquido de un nivel a otro. Por eso, diversas compañías han elaborado distintos sistemas de detección de fallas que difieren en precios, modelos y métodos.

Un adecuado Sistema de Detección de Fallas para una Bomba Centrífuga debe dar seguridad a la planta sobre el funcionamiento de la misma, detectando fallas cuando estas recién están empezando, de esta manera se evitarían pérdidas económicas, de recursos materiales, de tiempo y accidentes en la planta.

La presente tesis tiene como objetivo el Diseño de un Sistema de Detección de Fallas para Bomba Centrífuga, esta se basará en el método de análisis vibracional.

En el primer capítulo se desarrollará una descripción de la Planta Intercambiador de Calor y de la Bomba Centrífuga en la cual se van a realizar las pruebas.

Se detallará la metodología que se usará para la detección de fallas en la bomba centrífuga y las partes que la componen, la etapa transductor y el método seleccionado, que es el de análisis vibracional, en el segundo capítulo.

En el tercer capítulo se llevará a cabo el Diseño de Sistema de Detección de Fallas para una Bomba Centrífuga, basado en el método de análisis vibracional, donde se detallara la selección del transductor y el programa que nos permitirá conocer el estado de funcionamiento y la falla que está ocurriendo, en la bomba centrífuga.

Se llevarán a cabo las pruebas y los resultados, los cuales nos permiten realizar un análisis del método empleado en el capítulo cuatro.

Finalmente, se mostrarán las conclusiones a las que se han llegado en el presente trabajo, así como las recomendaciones para la realización de estos estudios. Adicionalmente, se incluye un anexo, que contiene las hojas técnicas del transductor seleccionado.



1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA INTERCAMBIADOR DE CALOR Y BOMBA CENTRIFUGA

1.1 Descripción de la Planta

La planta en la cual se va a trabajar tiene como principal objetivo, controlar el nivel de temperatura de agua que se encuentra almacenada en un tanque, haciendo uso del intercambiador de calor y de un sistema de lazo de control.

La planta cuenta con 2 bombas centrifugas monofásicas, cada una tiene una función diferente, una bomba se encarga de transportar agua del tanque de suministro hacia el tanque de agua caliente. Mientras que la segunda bomba se encarga del transporte de agua del tanque de suministro hacia el intercambiador de calor.

En esta la planta, la válvula proporcional de accionamiento neumático, tiene como función controlar el ingreso de agua caliente al intercambiador de calor, controlando el nivel de temperatura del agua, debido a eso regular el flujo que va ingresar al intercambiador de calor.

En la figura 1.1 se muestra el diagrama P&ID de la planta.

DIAGRAMA P&ID DE LA PLANTA

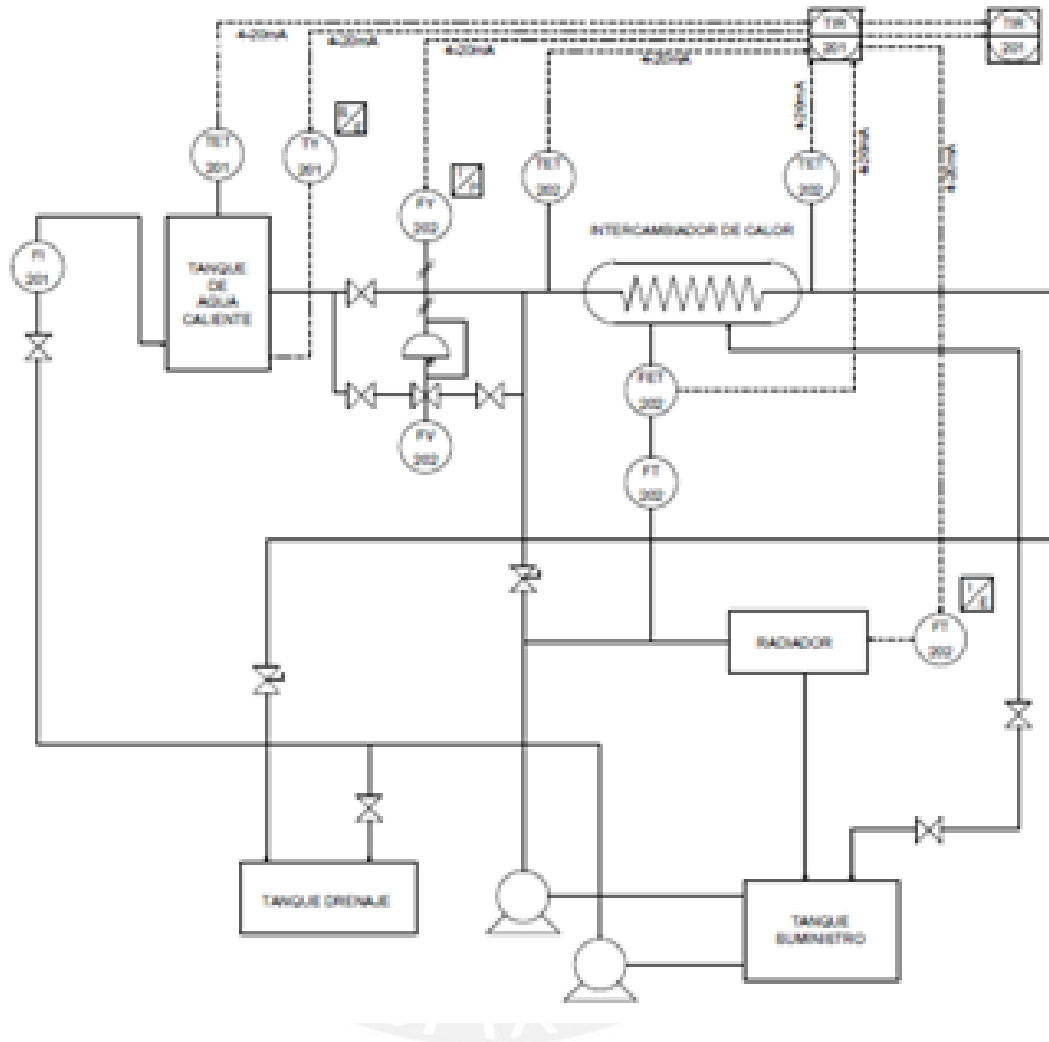


Fig. 1.1 Diagrama P&ID de la Planta Intercambiador de Calor

1.2 Descripción de la Bomba Centrífuga

1.2.1 Introducción

Las bombas centrífugas son parte importante dentro de una planta industrial debido a que tienen como principal función el mover un cierto volumen de líquido entre dos niveles, por lo tanto son máquinas hidráulicas que transforman un trabajo mecánico en otro de tipo hidráulico.

Este tipo de bombas son las de mayor uso en la plantas industriales, debido a sus características como el de alta eficiencia, precio, el mantenimiento que se le da a la misma no es tan costoso, es adaptable, desarrollado para el trabajo pesado, es compacto y robusto.

En la planta se va a diagnosticar las fallas que se presentan en una bomba centrífuga modelo Cpm130 Pedrollo, la cual funcionara por un motor eléctrico monofásico, el cual es de 0.75Hp y 3450 rpm; pero este sistema de diagnóstico de fallas también podrá ser adaptado a bombas centrífugas trifásicas. En la figura 1.2 se muestra una Bomba Centrífuga Cpm130.



Fig.1.2 Bomba Centrífuga Cpm130

1.2.2 Principio de Funcionamiento

El líquido que ingresa al cuerpo de la bomba, es impulsado por el rodete por fuerza centrífuga, al cual se le aumenta su velocidad, que luego es direccionado (por difusores) y que por diseño de la carcasa, esta produce un cambio de aumento de presión.

1.2.3 Partes de la Bomba Centrífuga

La bomba centrífuga tiene distintas partes que son las siguientes:

- **Eje:** Es una pieza tubular en la cual se ajustan todas las componentes rotatorias de la bomba, la cual debe ser recta, no desalineada, ya que su objetivo principal es que se encuentre alineada la bomba con el motor.
- **Impulsor:** Tiene como principal objetivo, el mover el líquido de un nivel a otro, saliendo de la bomba el líquido a una gran presión y a una menor temperatura. Este impulsor está compuesto por alabes, las cuales hacen impulsar el líquido.
- **Sello Mecánico:** Cierre mecánico de la bomba, el cual se refrigera con el agua que va ser bombeada, además de darle su funcionamiento cuando la bomba está trabajando.
- **Carcasa:** Es lo que cubre a la bomba. Puede ser fabricado de distintos materiales, para agua potable, es de hierro fundido.
- **Ventilador:** Es la que se encarga de la refrigeración por aire del motor.
- **Rodamientos:** El eje del rotor del motor, está colocado sobre rodamientos en los extremos, los cuales debes ser sellados y lubricado, para que tengan un buen tiempo de funcionamiento.
- **Rotor:** Componente del motor de la bomba, que se encarga de transmitir la potencia mecánica generada a través del motor.
- **Estator:** Parte del motor de la bomba y complemento del estator, que hace que pueda funcionar el motor.
- **Capacitor:** Se utiliza para arrancar la bomba centrífuga.
- **Cuerpo de Bomba:** Carcasa de la bomba.

En la figura 1.3 se muestra las partes de una bomba centrífuga.

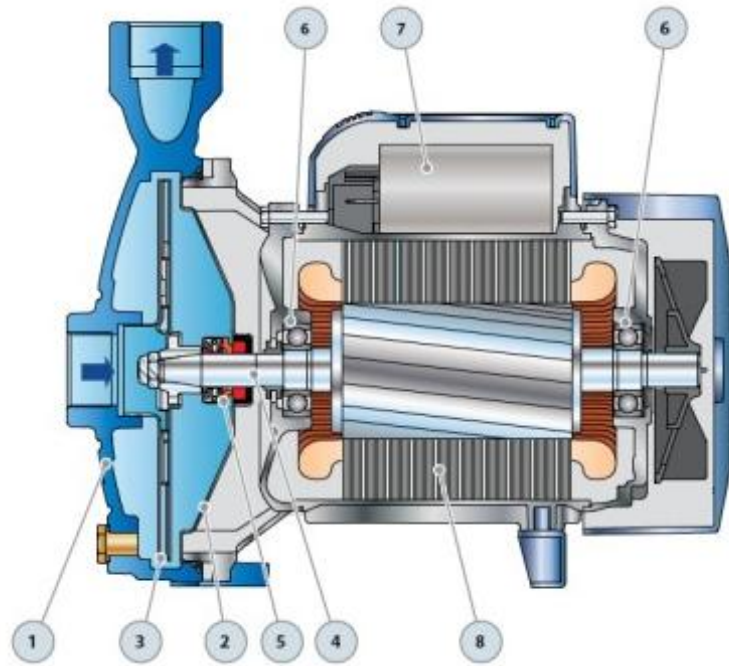


Fig. 1.3 Partes de la bomba centrífuga CPm130

A continuación se detallan los números que se muestran en la figura 1.3.

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| 1. Carcasa | 5. Sello Mecánico |
| 2. Cuerpo de la Bomba | 6. Rodamientos |
| 3. Impulsor | 7. Capacitor |
| 4. Eje del motor | 8. Motor Eléctrico |

1.2.4 Dimensiones y Peso de la Bomba Centrífuga

En la fig. 1.4 y la tabla 1.1 se detalla las dimensiones y peso de la Bomba Centrífuga Cpm 130.

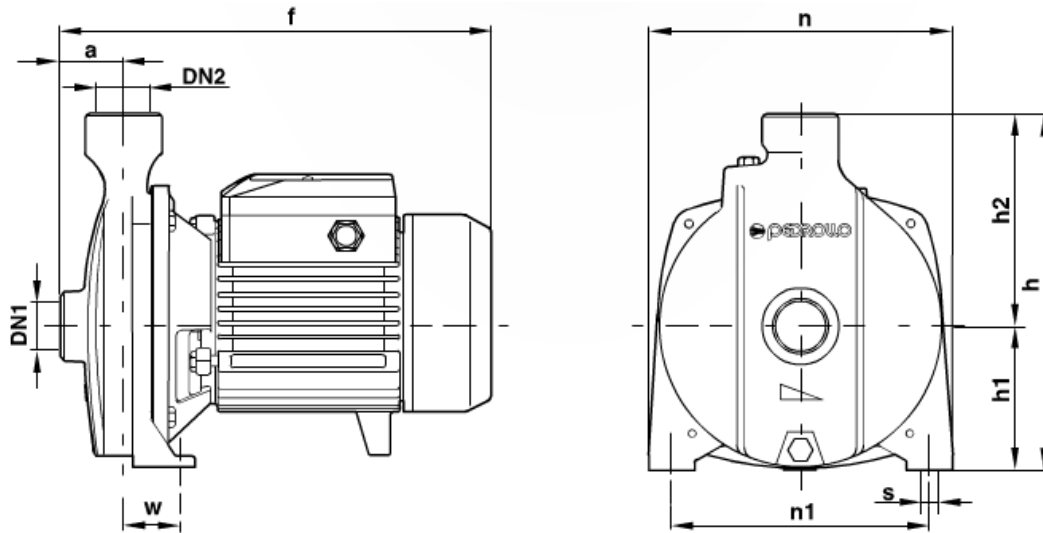


Fig. 1.4 Gráfica de dimensiones de la Bomba Centrífuga Cpm 130

MODELO	PUERTOS		DIMENSIONES(MM)								PESO(KG)	
	DN1	DN2	a	f	h	h1	h2	n	n1	w		s
CPm130	1"	1"	42	259	205	82	123	165	135	41	10	7.6

Tabla 1.1 Dimensiones y Peso de la Bomba Centrífuga CPm130

1.2.5 Curvas de Bombas Centrífugas

- **Curva Carga-Caudal (H-Q)**

Esta tipo de curvo es normalmente decreciente, ya que a medida que aumenta el caudal, disminuye la altura manométrica, además si el diámetro del impulsor es mayor cambia la forma de la curva.

En la figura 1.5 se muestra la curva Carga-Caudal (H-Q) de la bomba centrífuga CPm 130.

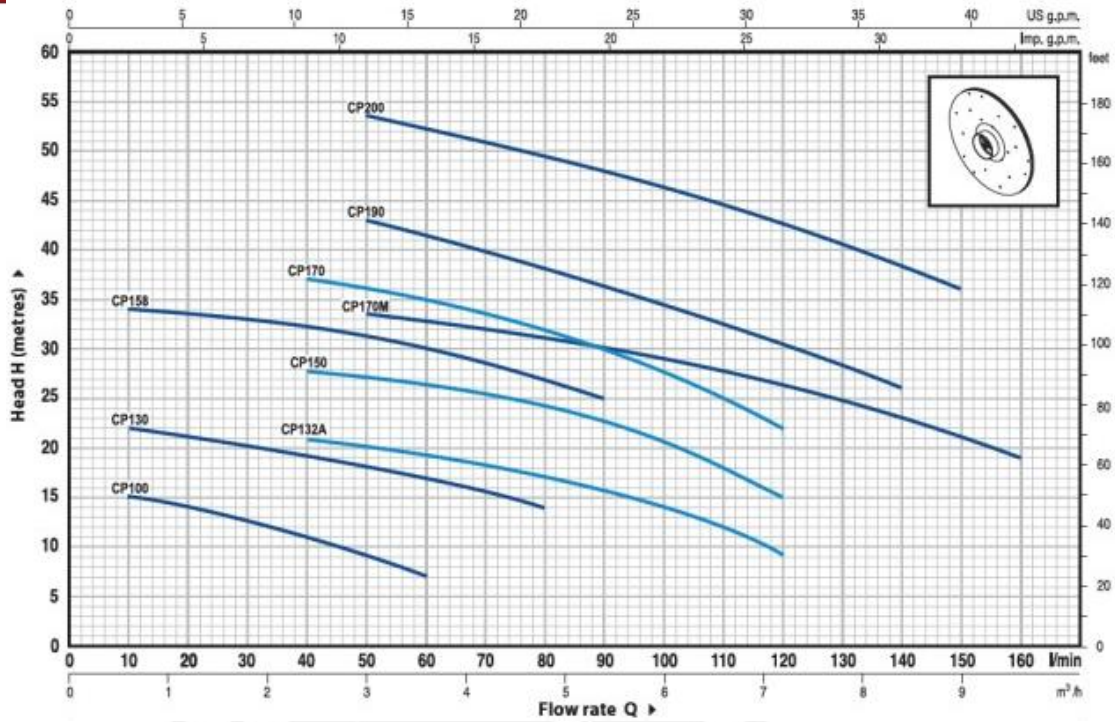


Fig. 1.5 Curva Carga-Caudal (H-Q) de la Bomba Centrifuga Cpm130

- **Curva Potencia-Caudal (P-Q)**

En este tipo de curva se aprecia que al aumentar el caudal, la potencia que es necesaria aplicar a la bomba debe aumentar (Fig.1.6).

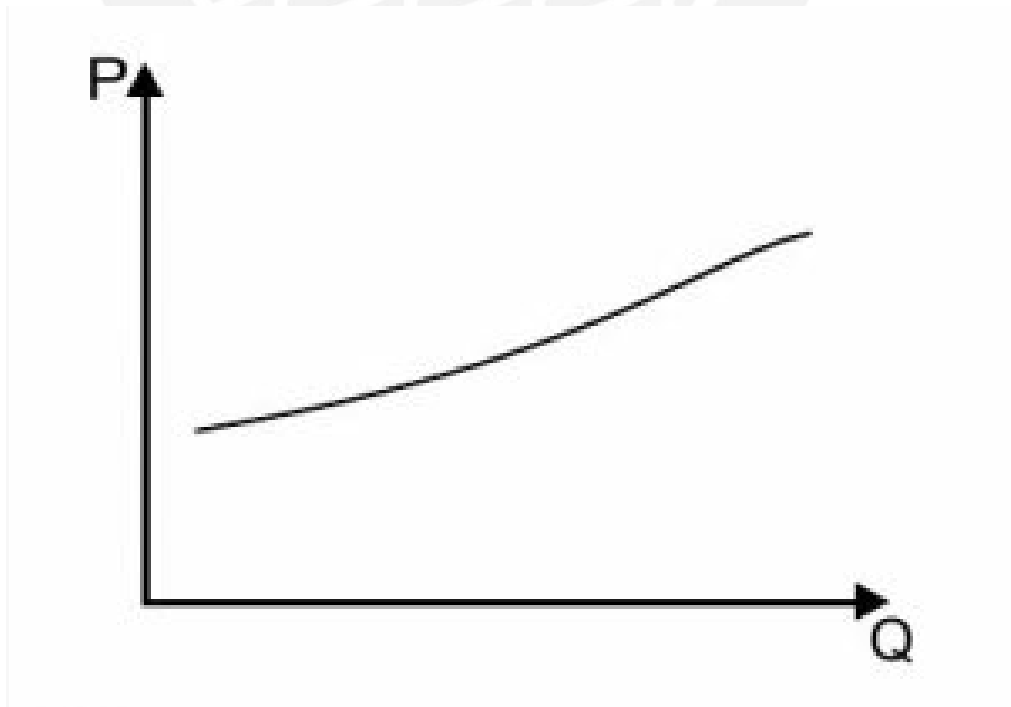


Fig.1.6 Curva Potencia-Caudal

1.2.6 Tipos de Fallas en Bombas Centrifugas

En las bombas centrifugas ocurren distintas fallas, que hacen que su funcionamiento no sea el correcto, originando pérdidas en la producción, económicas y del tiempo.

A continuación se detalla las fallas más comunes que se presentan:

Desbalanceo

Este tipo de falla, es la más común que se encuentra en las bombas. Se dice que una pieza se encuentra desbalanceada cuando su centro de masa (centro de gravedad) no coincide con su centro geométrico [1]. Esto se debe a que existe una distribución desigual del peso de la bomba, correspondiente a su centro geométrico.

Desalineamiento o Problemas en el Eje

Este tipo de falla, también suele ocurrir con frecuencia en la bomba centrifuga, debido al problema que supone alinear los dos ejes y sus rodamientos tanto de la bomba, como la del motor. Existen tres tipos de desalineamiento: el paralelo, angular y una combinación que pueda existir entre las dos. Además puede existir un desalineamiento producto de desgaste de la tapa o porta rodaje del motor, con lo cual el eje del motor ya no está alineado.

Falla Eléctrica

Este tipo de fallas suelen ocurrir debido a arranques frecuentes del motor, ventilación insuficiente y roturas de barras debido a la fatiga, siendo el rotor la parte del motor que más tiende a sufrir fallas. En la figura 1.7 se muestra un rotor quemado.

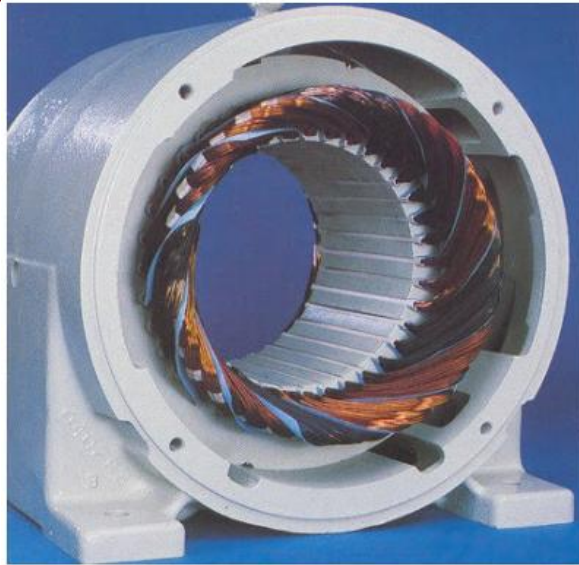


Fig. 1.7 Rotor quemado

- **Rodamientos**

Los rodamientos son componentes importantes dentro de una bomba, los cuales pueden malograrse debido a la contaminación, humedad, haga un esfuerzo mayor debido, a que haya un desbalance o desalineamiento en la bomba, que no se le haya dado la lubricación adecuada durante su mantenimiento, etc. En la figura 1.8 se muestra un rodamiento dañado.



Fig. 1.8 Rodamiento dañado

- **Cavitación**

La cavitación es el tipo de falla que consiste en la formación de burbujas de vapor que viajan a través del fluido hasta encontrar una región cuya presión es superior a la presión del vapor, donde colapsan e implosionan. Las burbujas se forman y se rompen muchas veces por segundo, esto genera ruido y vibraciones en la bomba [2]. Esto podría causar grandes daños a partes de la bomba, como el rodete. En la figura 1.9 se muestra un impulsor dañado.



Fig. 1.9 Impulsor dañado

1.3 Síntesis Sobre el Asunto de Estudio

En estos días las plantas industriales se esmeran por tener en buen estado y funcionando de manera adecuada las instalaciones que la conforman; mejorando sus equipos, realizando mantenimiento de manera periódica, siguiendo las normas de seguridad, realizando una buena instalación eléctrica en toda la planta y contratando a los mejores profesionales que le den el uso adecuado, pero a pesar de eso siguen ocurriendo fallas dentro de la planta que generan grandes pérdidas tanto económica y de tiempo.

El sistema de bombas centrifugas, es una instalación importante ya que se encuentra en las distintas plantas de procesos industriales, debido a que se encarga de mover un volumen líquido de un lugar a otro. En las plantas industriales se tienen una serie de bombas centrifugas en espera ya que en caso se malogre una, las otras bombas deben entrar en funcionamiento, para suplantar a la dañada.

De todas maneras es de vital importancia que una planta industrial cuente con un detector de fallas para su sistema de bombas, ya que evitaría que la empresa compre más bombas de repuesto, evitando pérdida de tiempo, un mantenimiento más costoso en la bomba dañada, etc.

En estos tiempos han aparecido dispositivos que nos permitan detectar las fallas en los motores y en algunos casos si estos corresponden a las bombas de agua, métodos que nos permiten analizar el funcionamiento de estas dentro de la planta. Asimismo se ofrecen consultorías dedicadas a la detección de fallas con profesionales especializados y sus respectivos equipos, cuyo servicio es eficiente y de gran costo.

Además las distintas investigaciones que se dan en este tema permiten tener un mayor conocimiento acerca de la detección de fallas y de las distintas formas en que se pueda detectarlas, siempre y cuando uno tenga los conocimientos de control y automatización. Lo anterior permitirá explorar más dentro de ese campo y poder desarrollarlo de manera adecuada, con lo cual se pueda desarrollar un sistema de diagnóstico de fallas en bombas centrífugas de distintas formas a través de análisis vibracional o de ultrasonido.

2 METODOLOGIA DE DETECCION DE FALLAS EN BOMBAS CENTRIFUGAS

2.1 Introducción

Existen varios métodos de detección de fallas, como los que se expone en [3], [24], [25] y [26].

El método a utilizar será el de Análisis Vibracional el cual se puede realizar mientras la máquina se encuentre en funcionamiento, lo cual conlleva a que no se pierda tiempo desmontando la bomba de la planta y permite que el análisis se realice en el mismo lugar, por lo cual no habrá pérdida de tiempo, además de poder detectar distintas fallas y porque la vibración siempre está presente en el funcionamiento de una bomba centrífuga. Este método consiste en ubicar un transductor de vibración en la parte externa de la máquina, este se encarga de transformar las señales vibratorias en señales eléctricas. Luego, estas señales eléctricas, a través de la tarjeta de adquisición de datos son ingresadas a una computadora donde se realizan diferentes tipos de procesamientos para obtener toda la información que se requiere para el análisis de las vibraciones de las máquinas [4].

La vibración es el movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio [5].

Durante el funcionamiento de las bombas centrífugas siempre existirán vibraciones a pesar de estar en buen estado. Estas pueden deberse al lugar en donde se encuentran instaladas las máquinas. Sin embargo, la magnitud de la vibración se incrementa al producirse fallas relacionadas como la cavitación, defectos en el rodete, etc. las cuales hacen que cambie la intensidad o dirección en el cual está trabajando la bomba.

En la figura 2.1. se muestra la representación gráfica del método de análisis vibracional.

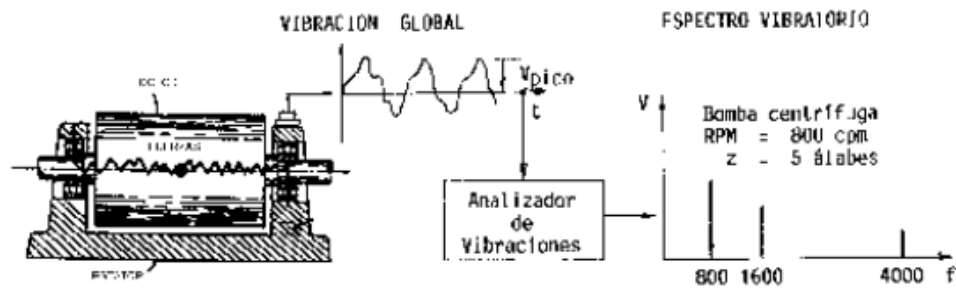


Fig.2.1 Análisis espectral y de la forma de onda de una bomba centrífuga

Mediante este método se pueden obtener distintos parámetros que servirán para el análisis y obtener parámetros como frecuencia, desplazamiento, velocidad y aceleración. A través del método de análisis vibracional, se puede obtener un resultado de la falla que presenta la bomba centrífuga ya que existen distintas técnicas de análisis vibracional.

En la figura 2.2 se muestra las etapas del Análisis Vibracional:

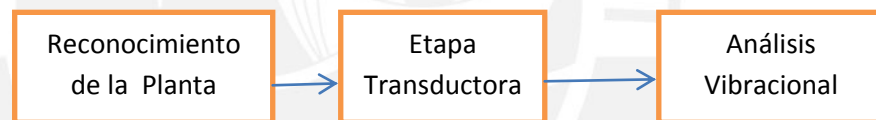


Fig. 2.2 Etapas del Análisis Vibracional

2.2 Reconocimiento de la Planta

Es necesario tener un conocimiento del funcionamiento de la planta, así como conocer cuáles son las máquinas que componen esta planta, para poder determinar el origen de las fallas que presenta la bomba y si éstas tienen como origen algún elemento o parte de la planta que origina ese problema.

2.3 Etapa Transductor

Esta etapa es la primera en el análisis vibracional, ya que se necesitan obtener datos de la vibración de la máquina en nuestro software, para esto datos es necesario el uso de un transductor.

El transductor es el elemento que transforma la vibración mecánica en una señal eléctrica analógica, para ser procesada, medida y analizada [6].

Existen diversos tipos de transductores entre los que destacan: Transductor de desplazamiento, de velocidad y aceleración.

2.3.1 Transductor de Desplazamiento

Este tipo de transductor también conocido como sondas de Eddy (Ver Figura 2.3) o proximetros se aplica en máquinas que trabajen a bajas frecuencias.



Fig. 2.3 Sondas de Eddy

Los proximetros se emplean para medir el desplazamiento radial o axial de ejes. Se instalan en las cubiertas de rodamientos o a su lado y detectan el desplazamiento del eje en relación a su posición de anclaje (Ver Fig. 2.4). Un sistema de captación de proximidad de tipo Eddy se compone del propio sensor y un acondicionador de señal [7].

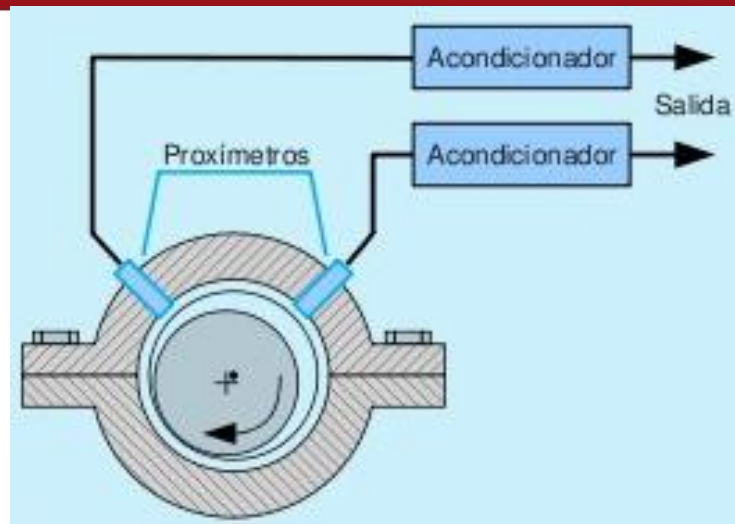


Fig. 2.4 Proximetros en un cojinete

- **Ventajas**
 - Mide el movimiento relativo entre su punta y el eje de giro [8].
 - No posee partes móviles.
 - Se emplea en máquinas cuya carcasa tiene poca amplitud de vibración.
 - Las puntas de aproximación son rígidas.
 - Fácil calibración.
- **Desventajas**
 - Difícil instalación
 - No se puede emplear en todos los metales.
 - No realiza una medida exacta en caso el eje tenga golpes o pequeñas grietas.
 - Tiene un rango de frecuencia limitado de 1000Hz
 - Requiere acondicionar la señal que entrega.

2.3.2 Transductor de Velocidad

Este tipo de transductor se aplica en máquinas cuya carcasa tiene grandes amplitudes de vibración. Se compone de un imán permanente ubicado en el centro de una bobina de hilo de cobre. Cuando la carcasa vibra, se crea un movimiento relativo entre el imán y el bobinado, induciéndose por la ley de Farada una tensión proporcional a la velocidad del movimiento [9]. En la figura 2.5 se aprecia el transductor de velocidad y sus partes.

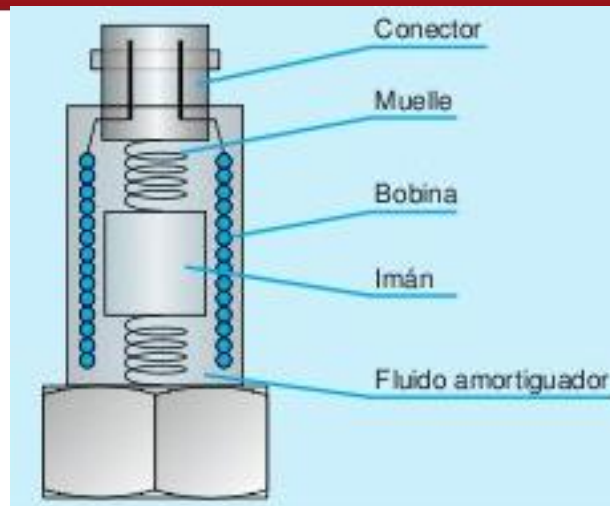


Fig. 2.5 Transductor de Velocidad

- **Ventajas**
 - No necesita de una fuente externa de alimentación.
 - Con una diferenciación o integración, convierte la señal a otras unidades de amplitud.
- **Desventajas**
 - La calibración se puede ver perjudicada por el uso y la temperatura.
 - No trabaja a altas temperaturas, ya que la salida entregada va verse reducida por el campo magnético que disminuye.
 - Son de gran tamaño, por ende sus bases magnéticas también.
 - El rango de frecuencias es de 10 – 1000 Hz, lo que no permite trabajar en máquinas de mayor velocidad.

2.3.3 Transductor de Aceleración

El más importante y de mayor uso en el análisis vibracional es el Acelerómetro, debido a que es más pequeño y tiene un mayor rango de frecuencia. Además, permitirá conocer datos como velocidad y desplazamiento vibratorio mediante la integración y así tener un análisis más amplio de las vibraciones, siendo su unidad g.

Hay dos tipos de acelerómetro:

Acelerómetro Uniaxial (Fig. 2.6) Posee un elemento sensor que es capaz de medir la aceleración paralela a su eje de actuación [10], este sensor cuenta con un solo eje de medición.

Si hacemos uso del acelerómetro uniaxial, es necesario colocar el acelerómetro en la dirección adecuada, la cual puede ser axial, vertical y horizontal (Fig. 2.7), ya que de esa forma se podrán obtener los resultados adecuados. Este eje siempre es perpendicular a la superficie a la cual se coloca el acelerómetro.

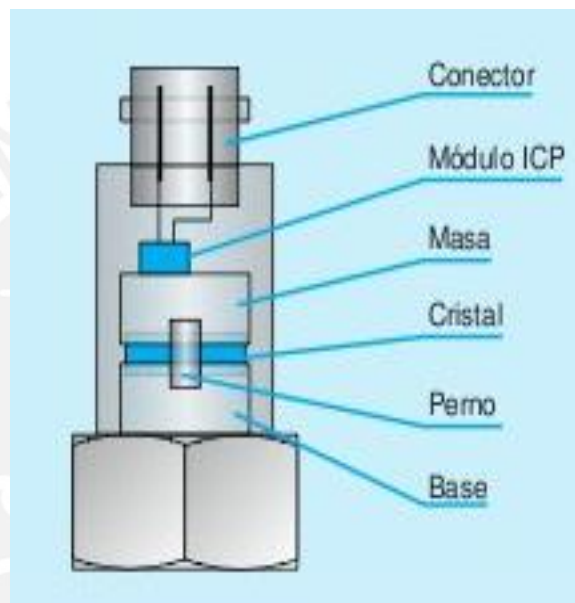


Fig. 2.6 Acelerómetro Uniaxial

Además, este tipo de acelerómetro es el más usado en bombas centrífugas, debido a que la potencia con la cual trabaja una bomba monofásica no es tan elevada y el vector aceleración que se desea medir es perceptible, de modo que se pueda colocar el acelerómetro en la posición deseada.

Sin embargo, existen casos en los que la aceleración puede cambiar de dirección durante el tiempo, lo que no permite obtener los datos esperados. Esto suele ocurrir en motores o bombas que trabajen a una potencia muy elevada, lo que no ocurre en este caso.

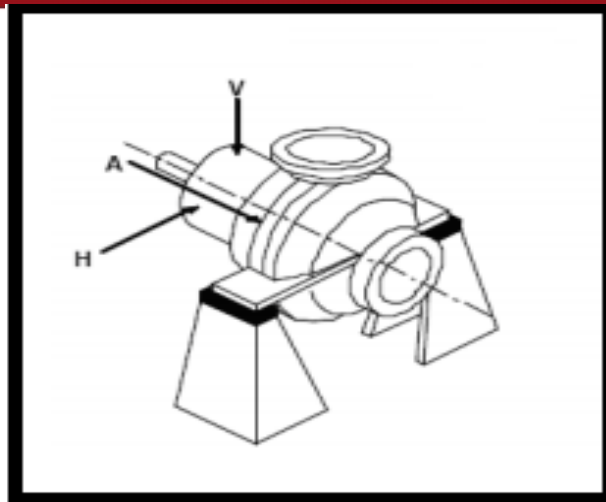


Fig. 2.7 Puntos de toma de Datos de Bomba

Acelerómetro Triaxial presenta una estructura más compleja debido a la unión de 3 uniaxiales (axial, horizontal y vertical) una sola muestra se puede tener información suficiente de la vibración de la bomba.

Existen distintos modelos de acelerómetros siendo el más comercializado, el acelerómetro piezoeléctrico con IEPE, que a diferencia del acelerómetro piezoeléctrico, cuenta con un amplificador de carga que puede conectarse directamente a la tarjeta de adquisición de datos ya que su cable de conexión no afecta a la señal transmitida. Dicha señal tiene poco ruido debido a que no va ser necesario conectar el sensor con el acondicionamiento de señal.

La selección y uso adecuado que se le da al acelerómetro es configurable puesto que es el dispositivo el que tiene un alto costo; además hace un buen análisis de los datos técnicos del acelerómetro para su adquisición.

Acondicionamiento del Acelerómetro

Esta etapa consiste en mejorar la señal que se obtiene de la etapa transductora ya que puede contener ruido o puede ser de baja magnitud, con lo cual no se podría realizar un buen análisis vibracional de la bomba.

Si el transductor con el que vamos a trabajar es un **acelerómetro piezoeléctrico**, no va ser necesario conectarlo a una fuente de alimentación, pero si va ser necesario diseñar un circuito electrónico que acondicione,

amplifique y filtre la señal (Fig. 2.8), debido a la alta impedancia de salida, con lo cual la señal pueda ser registrada por la tarjeta de adquisición de datos.

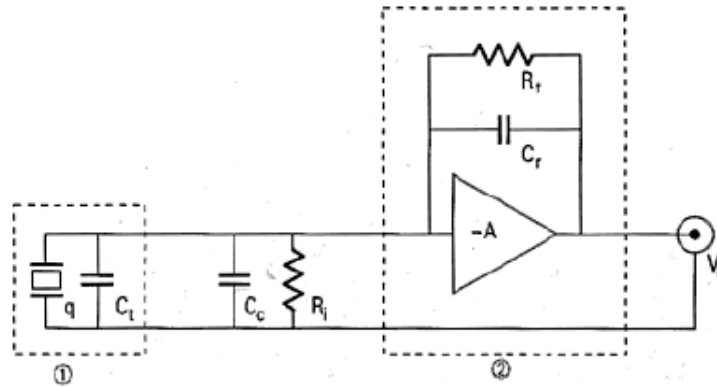


Fig.2.8 Acondicionamiento de la señal de Acelerómetro Piezoeléctrico

En el esquema se aprecia dos partes: la parte 1 corresponde al acelerómetro, en el cual q es el generador de carga eléctrica mientras que C_t , es la impedancia capacitiva del mismo. El C_c y R_i representan la impedancia del cable que se va conectar entre el acelerómetro y el circuito del acondicionamiento de señal.

El circuito del acondicionamiento de señal, es un amplificador en modo inversor de alta impedancia de entrada. A la salida del circuito se obtiene la señal de carga eléctrica amplificada y la impedancia de salida disminuida. Con estas características la señal puede ser registrada por la tarjeta de adquisición de datos.

Se debe tener en cuenta que el cable que se va conectar entre el acelerómetro y el circuito del acondicionamiento de señal esté en buenas condiciones y conectado de manera adecuada para evitar el acoplamiento de la señal de ruido.

La expresión que obtenemos del esquema de acondicionamiento de señal es el siguiente:

$$V_o = \frac{-q}{C_r} * \frac{1}{1 + \frac{1 * (C_t + C_r + C_c)}{A * C_r}}$$

Debido a que el factor de amplificación A es elevado, se desprecia el efecto de impedancia tanto del cableado como del acelerómetro. El resultado es una expresión determinada por la carga eléctrica del acelerómetro y la capacitancia del amplificador.

$$V_o = \frac{-q}{Cr}$$

En la actualidad se encuentra en el mercado transductores que ya cuentan con un acondicionamiento de señal como el **acelerómetro piezoeléctrico con IEPE** que se detalló anteriormente. Solo se necesita el diseño de una fuente de alimentación para alimentar el transductor, se recomienda que para este acelerómetro, la corriente sea de 2mA y 24Vdc.

Por lo tanto es necesario implementar un circuito que suprima la descarga electrostática, contando con un diodo regulador CR220, el cual entregará la corriente de polarización necesaria para el acelerómetro. La fuente de alimentación tiene que ser de 24Vdc y proporcionar corriente continua; el condensador (22uF) suprimirá la componente DC de la señal.

El diodo regulador CR220, es la combinación de un JFET con una resistencia integrada que forman un componente, con facilidad de operación, opera con rangos de corriente de 1.6 mA a 4.7 mA.

En la figura 2.9 se presenta la curva de funcionamiento del diodo regulador de corriente CR220. El datasheet del diodo CR220 se expone en [11].

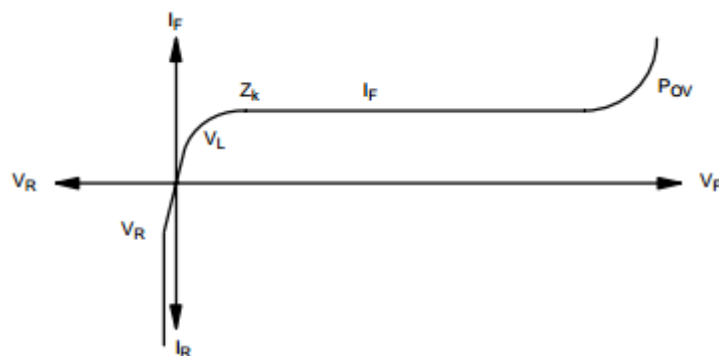


Fig. 2.9 Curva de Funcionamiento del diodo CR220.

En la figura 2.10 se presenta la fuente de alimentación del transductor.

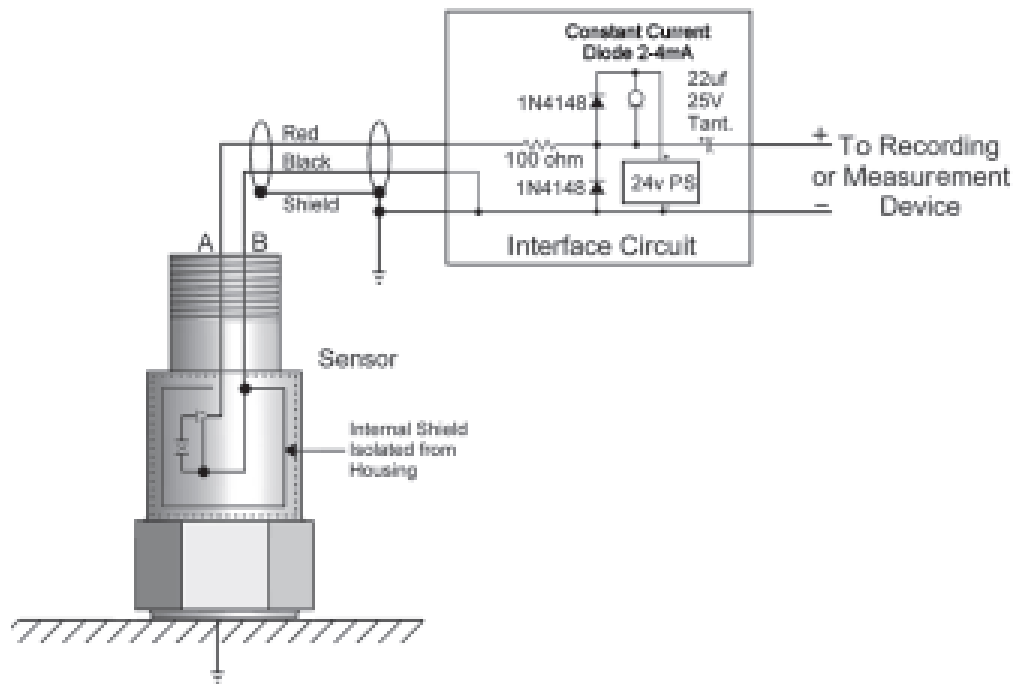


Fig.2.10 Esquema de Fuente de Alimentación para el Transductor

- **Ventajas**

- Mide vibración de la carcasa de la bomba.
- Gran rango de respuesta en frecuencia.
- De tamaño compacto.
- El montaje es de manera fácil con bases magnéticas.
- El acelerómetro piezoeléctrico IEPE, cuenta con un acondicionador de señal interno.

- **Desventajas**

- Los acelerómetros piezoeléctricos IEPE, necesitan una fuente de alimentación externa.

2.4 Análisis Vibracional

2.4.1 Fundamentos de Vibraciones

2.4.1.1 Introducción

En su forma más sencilla, una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. [12]. Esto indica que las bombas generan una señal de

neutral. Es la intensidad de la vibración, y es indicativa de la severidad de la misma [14].

Las unidades de la amplitud de la vibración cambian de acuerdo al tipo de medida que se quiere realizar:

- Desplazamiento de la Vibración: mm
- Velocidad de la Vibración: mm/s
- Aceleración de la Vibración: g

Existen distintas formas de medir la amplitud de una onda, como se muestra en la figura 2.12:

- **El valor pico (p)**, expresa la distancia que existe entre cero y la mayor amplitud de la onda en el tiempo, puede ser positiva o negativa.
- **El valor Pico-Pico (p-p)**, expresa la distancia que existe entre la mayor amplitud positiva y negativa de la onda en el tiempo.
- **El valor RMS (rems)**, es igual a 0.707 del valor pico, en la onda de la curva siempre que esta sea sinusoidal, se usa para medir la energía de la onda.

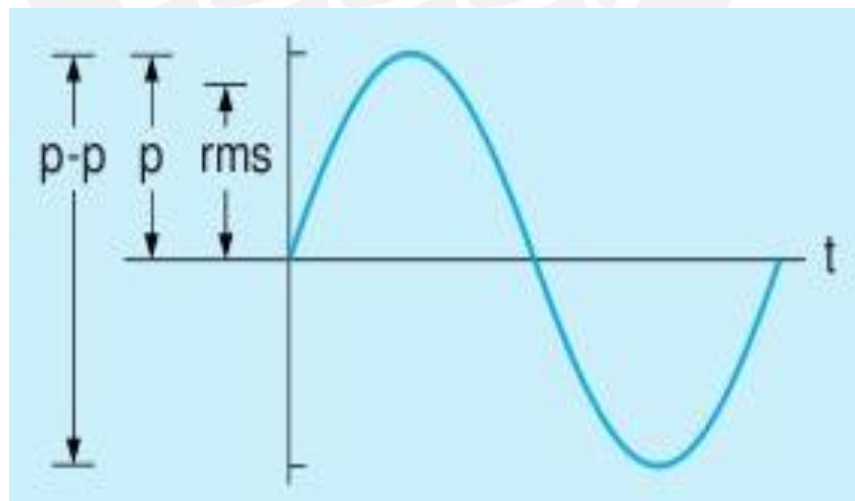


Fig. 2.12 Distintas medidas de Amplitud

2.4.1.3 Tipos de Vibración

- **Vibración Simple**

Denominamos vibración simple cuando en el espectro de la misma en frecuencia aparece únicamente una sola frecuencia. Podemos decir de forma más coloquial que la vibración simple, sólo está compuesta por una onda [15]. En la figura 2.13 se muestra como se repite un mismo movimiento.

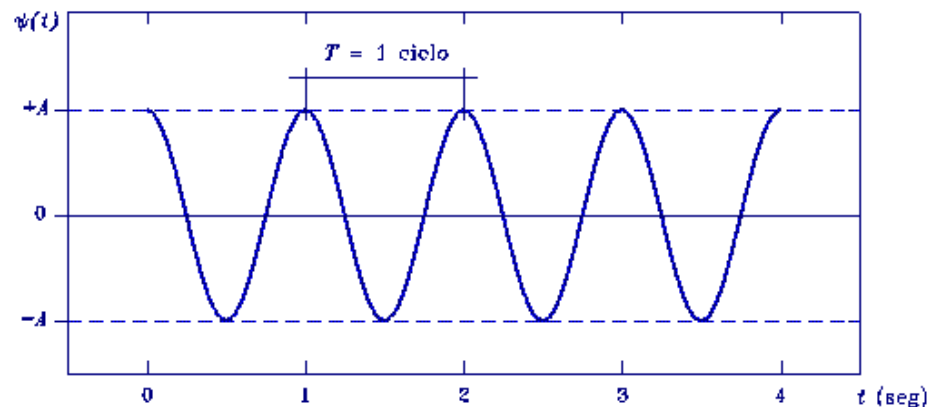


Fig. 2.13 Vibración Armónica Simple

Para poder determinar este tipo de vibración es necesario establecer dos parámetros, que son amplitud(A) y frecuencia f , con estas podremos formar una función trigonométrica, que serían la función Seno y Coseno:

$$\text{Función Seno: } \gamma = A \sin 2\pi f$$

$$\text{Función Coseno: } \gamma = A \cos 2\pi f$$

- **Vibración Compuesta**

La vibración compuesta es la suma de distintas variaciones simples. Esto se da en las maquinas (motores, bombas, etc.), ya que su vibración representa una serie de vibraciones simples que corresponden a cada parte de la misma. Con lo cual la forma de onda de vibración no es una señal sinusoidal, más bien llega a ser compleja la misma. En la figura 2.14 se muestra la suma de una serie de ondas sinusoidales de distinta frecuencia que forman una vibración compuesta.

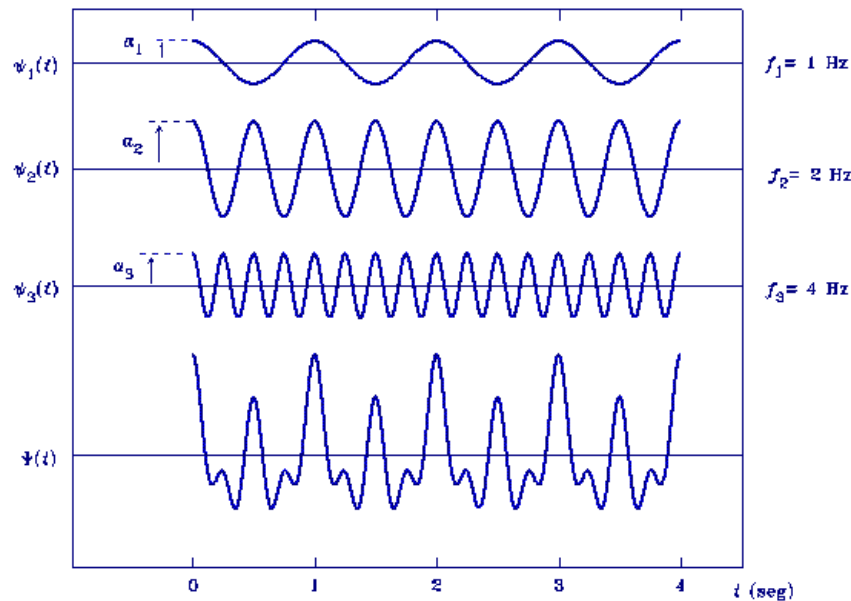


Fig. 2.14 Vibración Armónica Compuesta

El problema se presenta al momento de interpretarlas, más aun si se quiere tener información de los parámetros de cada onda.

2.4.2 Fundamentos de Transformada de Fourier

Como se explicó anteriormente las vibraciones de las maquinas (bombas centrifugas) van a ser compuestas y se va encontrar la información del comportamiento de la bomba.

Pero al momento de analizarla va resultar compleja ya que se va tener mucha información por las distintas ondas que la conforman.

Por eso al realizar un estudio de las vibraciones, se va tener que analizar las señales en el dominio de la frecuencia, aplicando la Transformada de Fourier, que nos permitirá obtener una gráfica de amplitud vs frecuencia, también conocida con el nombre de espectro, a partir de la señal de vibración entregada por la máquina.

En la figura 2.15 se muestra la FFT de una vibración compuesta, se puede ver la señal de vibración compuesta, además las distintas señales de

vibración simple que la componen en el dominio del tiempo y la más importante la del dominio de la frecuencia, la que se encontró empleando la transformada de Fourier, se aprecia en ese espectro que se obtuvo las frecuencias y amplitudes de las señales de vibración simple que componen la vibración compuesta.

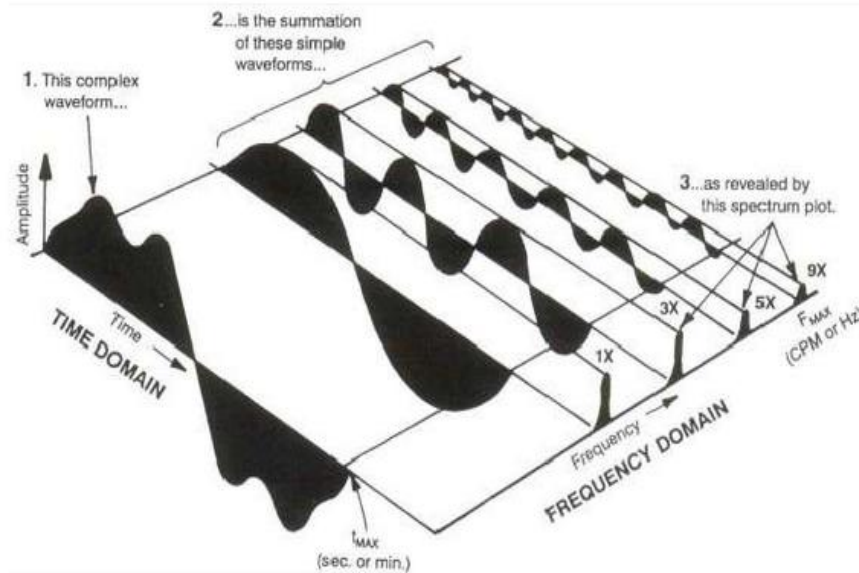


Fig. 2.15 FFT de una onda de vibración compuesta

2.4.3 Análisis Espectral de Bomba Centrífuga

Al medir la vibración de la bomba centrífuga, luego realizar la FFT a la señal, se va tener el espectro de la señal y tenemos que interpretar la misma, para identificar qué tipo de falla está ocurriendo en la bomba centrífuga. Los pasos a seguir para identificar la falla son los siguientes:

Identificación y número de picos de la vibración en el espectro:

Identificar en que frecuencia ocurre el pico y si este es igual a la que trabaja la bomba centrífuga, además de los armónicos u otros picos que aparezcan en el espectro.

Diagnóstico de falla: Determinar el tipo de falla a partir de la amplitud y los picos de vibración de la bomba centrífuga.

- **Espectro por Desbalanceo en la Bomba Centrífuga**

La señal de vibración de una bomba que presenta un desbalanceo, es la de una onda parecida a la sinusoidal, en la cual su fuerza de excitación es una vez por revolución. El espectro de esta onda, va ser representado por un pico en la frecuencia que trabaja la bomba. Esto se aprecia en la gráfica del espectro de frecuencia de la señal de una bomba (Ver Fig. 2.16).

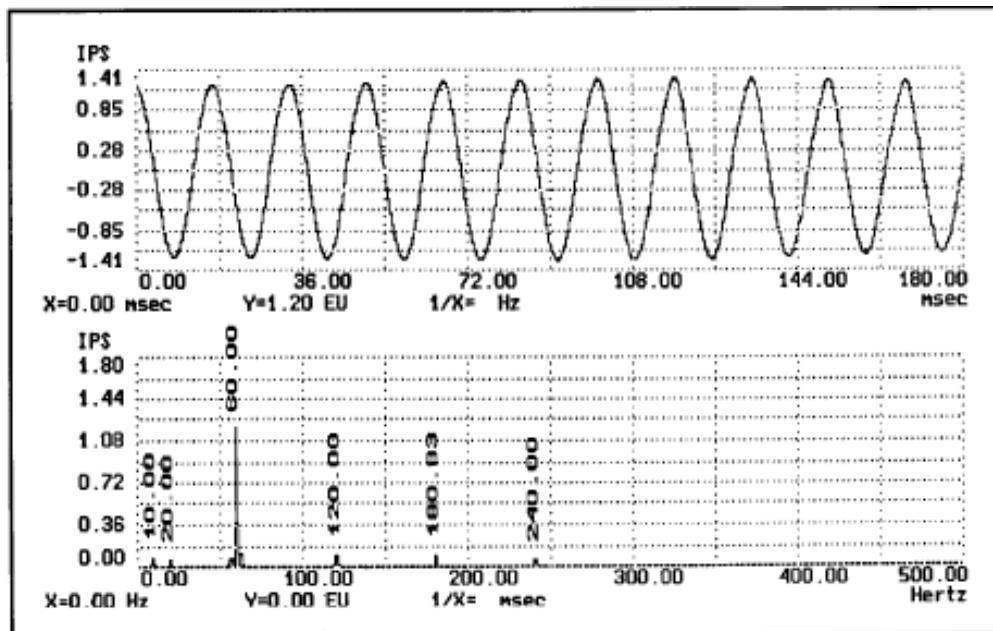


Fig. 2.16 Señal de forma sinodal y su espectro de frecuencia

Es recomendable realizar la medición en dirección radial debido a que la amplitud que proporciona el espectro es el doble del resultado obtenido en la dirección axial.

- **Espectro por Rodamientos en la Bomba Centrífuga**

La señal de vibración de una bomba que presenta falla en rodamientos, de un tren de pulsos. Cuando se obtiene la gráfica del espectro de frecuencia de la señal se observará una envolvente sobre diferentes armónicos debido a la frecuencia con que se repite el pulso, disminuyendo de amplitud a medida que aumente la frecuencia (Fig.2.17).

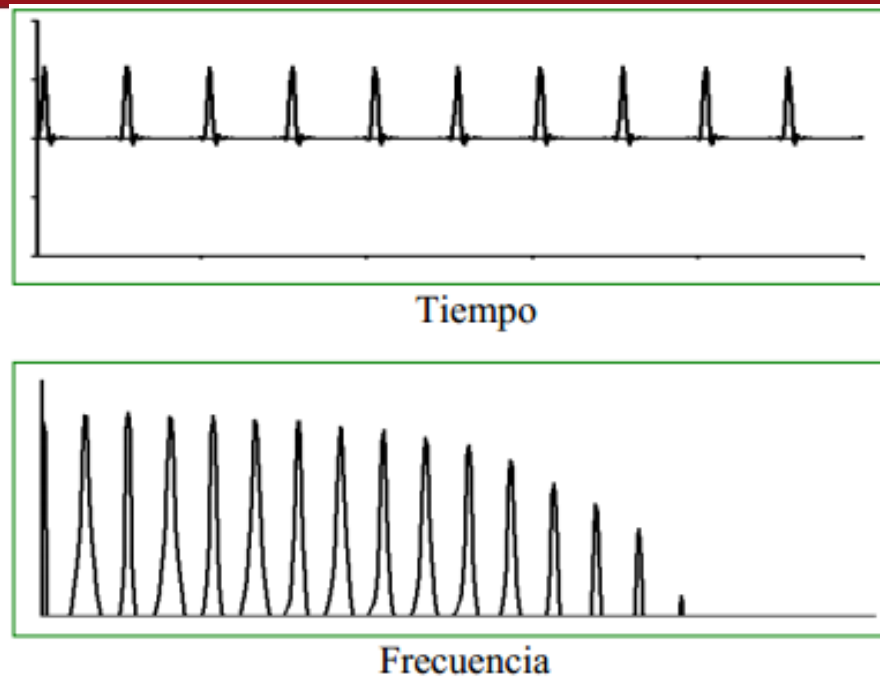


Fig.2.17 Señal de tren de Pulsos y su Espectro de Frecuencia

- **Espectro por falla eléctrica en la Bomba Centrífuga**

La señal de vibración de una bomba que presenta fallas en el rotor es el de una modulación de amplitud, cerca del 50%. El espectro de frecuencia que obtenemos a partir de esta señal es el de un pico en la frecuencia cargadora, acompañada de un componente lateral por lado (Fig. 2.18).

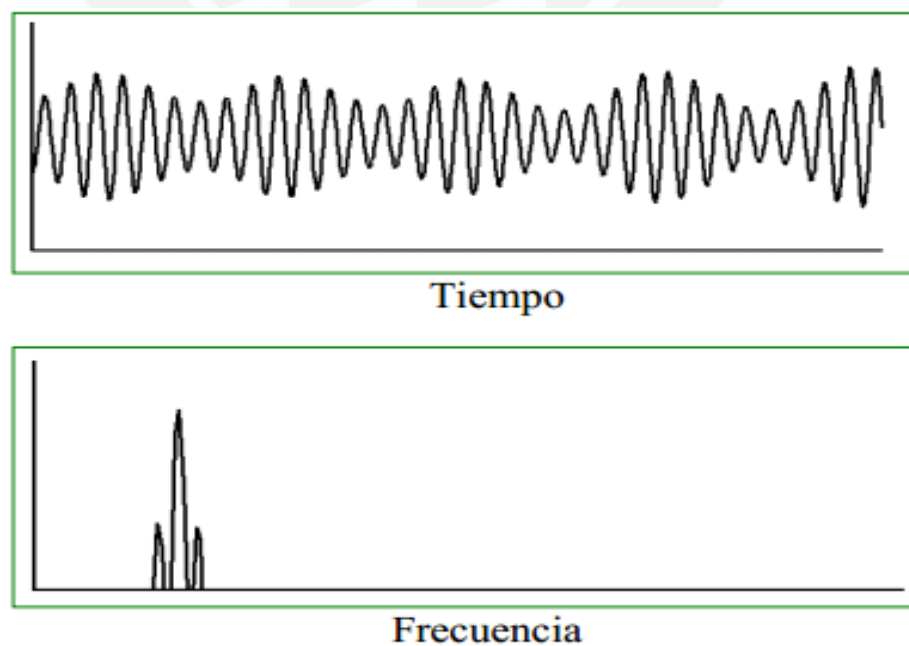
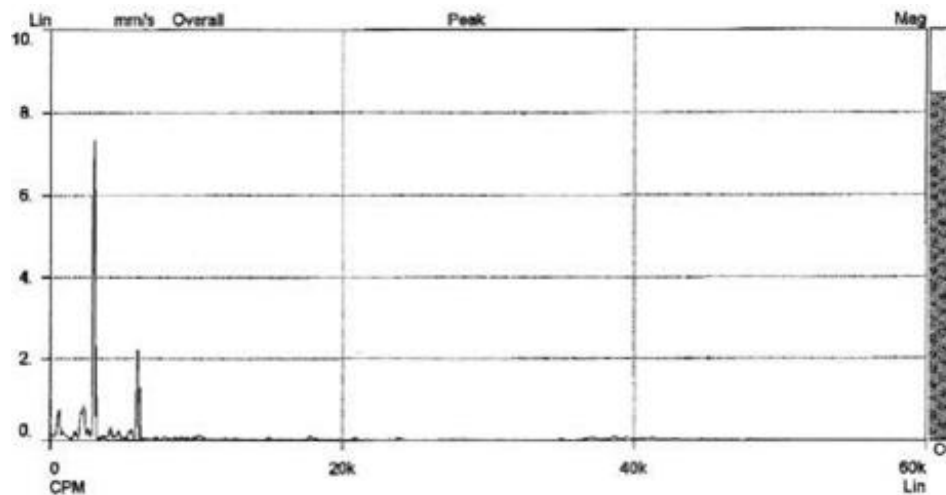


Fig. 2.18 Señal de Amplitud Modulada y su espectro de Frecuencia

- **Espectro por desalineación o falla en el eje de la Bomba Centrífuga**

El espectro de frecuencia cuando ocurre este tipo de falla es el dos picos que se encuentran en el primer y segundo armónico de la frecuencia a la que trabaja la bomba centrífuga (Ver figura 2.19).



2.19 Espectro de desalienación o falla en el eje (mm/s vs cpm)

- **Espectro por Cavitación de la Bomba Centrífuga**

La señal de vibración de una bomba que presenta cavitación es la de un impulso corto, siendo su espectro de frecuencia continuo (Ver Fig.2.20).

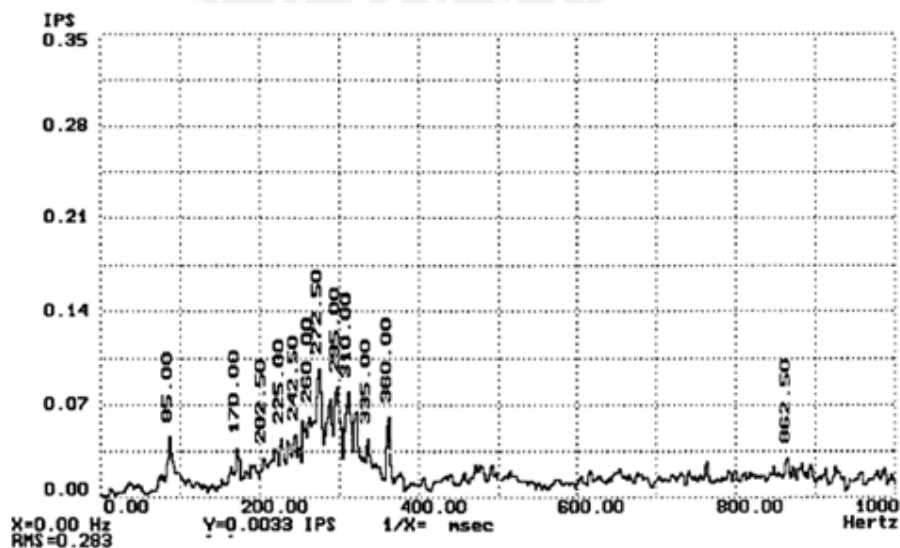


Fig. 2.20 Espectro de Cavitación

Además en distintos trabajos hay estudios de análisis vibraciones que aplican a las máquinas rotativas y bombas, mediante el método de Frecuencia la cual sirve como base para poder conocer cómo es el espectro de frecuencias que del transductor debido a una falla, ya que cada falla que se presente en la bomba tendrá un espectro diferente, además de patrones ISO 10816 el cual nos da un rango de valores respecto a la velocidad, en la cual podemos definir en qué estado de funcionamiento se encuentra nuestra bomba.

Así se encuentra la tabla: Table I-Illustrated Vibration Diagnostic Chart, realizada por la Technica Associates of Charlotte, la cual contiene la FFT de cada falla que se puede encontrar en la bomba, de esa manera guiarnos para reconocer a qué tipo de falla corresponde luego de conocer el análisis espectral de nuestra señal.

2.5 Norma de Vibración

Existen distintas normativas que nos permitirán conocer en qué estado de funcionamiento se encuentra la bomba centrífuga. Estas normas se basan en dos parámetros de vibración: la amplitud y frecuencia. Las normas más relevantes que existen sobre la severidad de vibraciones es la de la Organización Internacional de Normalización (ISO), en este caso se seleccionó la norma DIN ISO 10816-7, ya que está completamente dedicada a las vibraciones que pueda producir una bomba centrífuga, esta norma está en vigor desde agosto de 2009.

Para realizar la evaluación y medición de la vibración que produce la bomba centrífuga, se tiene que colocar el transductor sobre partes no rotativas.

En la figura 2.21 se muestra la tabla de la norma de vibración DIN ISO 10816-7.

DIN ISO 10816-7	Categoría 1		Categoría 2		
Tipo de bomba	Bombas centrífugas con una alta fiabilidad, disponibilidad o requisitos de seguridad.		Bombas centrífugas para aplicaciones generales o aplicaciones menos críticas.		r < 600 rpm
Potencia	< 200 kW	> 200 kW	< 200 kW	> 200 kW	0.5 rpm 1.0 rpm 2.0 rpm
Velocidad v_{rms}					Desplazamiento s_{rms}
10–1000 Hz r > 600 rpm	7,6		9,5		
	6,5		8,5		
2–1000 Hz r < 600 rpm	5,0		6,1		
	4,0		5,1		130
	3,5		4,2		80
	2,5		3,2		50
mm/s rms			mm/s rms		µm
	A		A		A

A Máquinas recientemente puestas en operación

B Operación a largo plazo sin restricciones

C Operación a largo plazo con restricciones

D Vibraciones que causan daños

Fig. 2.21 Tabla de Norma de Vibración DIN ISO 10816-7

Como se muestra en la gráfica, se divide en 2 categorías: bombas centrífugas con una alta fiabilidad, disponibilidad o requisitos de seguridad y bombas centrífugas para aplicaciones generales o aplicaciones menos críticas, luego estas se dividen en la potencia a la que trabaja la bomba centrífuga, de acuerdo a la velocidad de vibración, se podrá saber en qué estado de funcionamiento se encuentra a partir de los rangos de velocidad de la tabla. Los 4 estados de funcionamiento de la bomba son los siguientes:

- A. Maquinas recientemente puestas en operación
- B. Operación a largo plazo sin restricciones
- C. Operación a largo plazo con restricciones
- D. Vibraciones que causan daños.

2.6 Objetivos

Luego del estudio de las fallas en bombas centrífugas y los métodos, tenemos los siguientes objetivos en esta tesis:

- Diseñar un sistema de diagnóstico de fallas para una bomba centrífuga, basado en el método de análisis vibracional.
- Estudio del funcionamiento de las bombas centrífugas.
- Elección del método de detección de fallas en bombas centrífugas.



3 DISEÑO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN BOMBAS CENTRIFUGAS

3.1 Esquema General de Detección de Fallas

El diseño del Sistema de Detección de Fallas, en el presente trabajo consiste en utilizar distintos bloques de Matlab/Simulink como herramientas, que nos permita desarrollar el método de Análisis Vibraciones, además de complementarlo con una función para encontrar el tipo de falla que esté ocurriendo en la Bomba Centrífuga. En la fig. 3.1, se muestra el esquema general que se va utilizar para la detección de fallas.

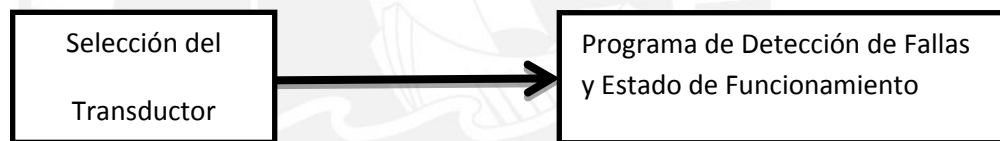


Fig. 3.1 Esquema general del Sistema de detección de fallas

3.2 Diseño del Sistema de Detección de Fallas

3.2.1 Selección del Transductor

En esta etapa se seleccionó un transductor que nos permita obtener los datos de vibración de la bomba centrífuga, el seleccionado fue el de aceleración, porque cumple los siguientes requerimientos:

- La relación que existe entre el peso de la carcasa a rotor (5 a 1 o menos) y los soportes de rodamientos de la bomba centrífuga, permiten que la mayoría de las fuerzas generadas se transmitan a la carcasa del rotor, caso contrario al transductor de desplazamiento que la mayor parte de las fuerzas se disipan entre el movimiento relativo entre el eje de las máquinas y sus cojinetes.

- Su precio era el más bajo a comparación de los otros transductores y se encuentra dentro del presupuesto de la implementación de la Tesis.
- Trabaja a alta temperatura, porque la detección de fallas se va a desarrollar en una planta intercambiador de calor, en cambio el transductor de velocidad no podría.
- Trabaja en un gran rango de frecuencia (60 a 3000000cpm), que permite realizar análisis vibracional en otros equipos que trabajan a mayor frecuencia.
- Es pequeño lo que hace posible que se pueda montar, en lugares donde la bomba centrífuga no tenga mucho espacio a su alrededor.
- La aceleración máxima debido a la vibración de una bomba centrífuga es de 10g a 3600 rpm [16], por lo cual se tuvo que elegir un acelerómetro cuyo rango dinámico sea mayor a 10g.

Existen distintas marcas de acelerómetro, por lo cual se realizó una comparación entre 2 marcas reconocidas, para seleccionar una de ellas.

En la tabla 3.1 se muestra la comparación entre estos 2 acelerómetros, de sus principales características:

	MARCA	MODELO
	CTC	Honeywell
	AC102-2C	MAT53
Sensibilidad	100mV/g	100mV/g
Rango dinámico	.+/- 50g, pico	.+/- 80g, pico
Respuesta de Frecuencia	2 - 10000 Hz	2 - 10000 Hz
Tiempo de Establecimiento	<2.5 segundos	-
Fuente de Voltaje	18-30 VDC	-
Corriente Constante de Excitación	2-10 mA	0.5 - 8 mA
Rango de Temperatura	.-50 a 121° C	.-18 a 93 °C
Cable Terminal	Coaxial	Coaxial
Peso	90 gramos	110 gramos
Precio	\$276.00	\$465.00

Tabla 3.1 Comparación de 2 Acelerómetros

Como se puede ver en la tabla 3.1, los dos acelerómetros tienen características similares, pero los requerimientos para seleccionar el transductor de aceleración son los siguientes:

- Soporte altas temperatura, ya que se va a realizar pruebas en una planta Intercambiador de Calor.
- Por la aplicación en control, convendría conocer su tiempo de establecimiento
- Costo accesible

Por lo cual se seleccionó el acelerómetro CTC – AC102-1A, ya que costaba menos de \$300, trabaja a temperatura mayor a 100° C y se conoce su tiempo de establecimiento. En la figura 3.2 se muestra el Transductor de Aceleración AC102-1A.



Fig. 3.2 Transductor de Aceleración AC102-1A.

Las características más importantes de este acelerómetro son las siguientes:

- Sensibilidad: 100mV/g
- Respuesta de Frecuencia: .30-900000 CPM
- Rango Dinámico: +/- 50 g, pico
- Max Temperatura: 121°C
- Tiempo de Establecimiento <2.5s

Además al ser un Acelerómetro Piezoeléctrico con IEPE, se tiene que desarrollar una fuente de alimentación para alimentar al transductor.

3.2.2 Programa de detección de fallas

3.2.2.1 Introducción

Este programa se desarrolló en el software Matlab/Simulink, en el cual se tuvo que integrar distintos bloques funcionales. En la figura 3.3 se muestra el programa principal implementado en Matlab/Simulink.

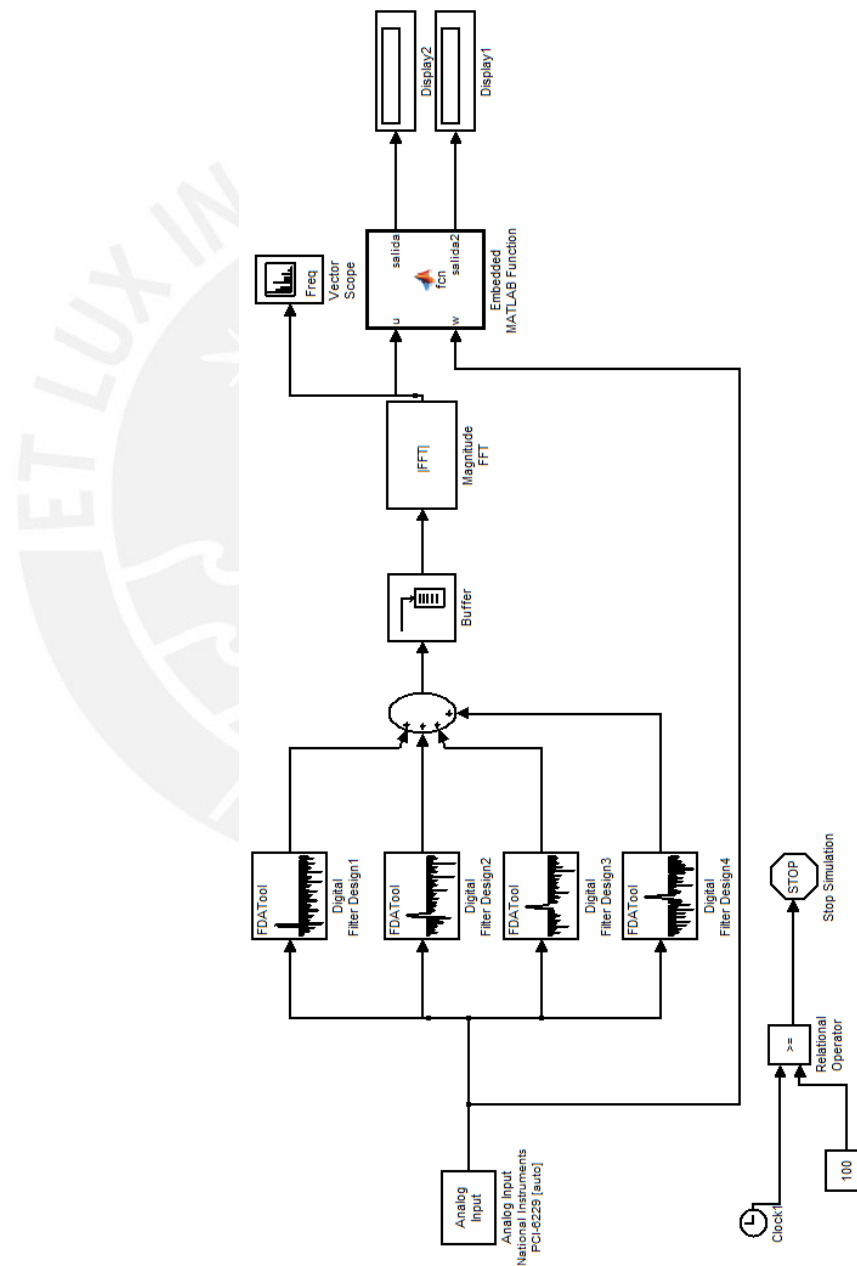


Fig. 3.3 Programa Principal de Sistema de Detección de Fallas

A continuación se detalla cada parte que integra el programa principal.

3.2.2.2 Tiempo de funcionamiento del Programa

Esta etapa consiste en el tiempo que debe funcionar el programa de detección de fallas, el cual se desarrolló con distintos bloques como el Clock1, que es un reloj dentro del programa, el constant que es 100, ya que el programa debe funcionar durante 100 segundos, luego se debe comparar el tiempo transcurrido del Clock1 con el Constant, si son iguales los dos, la ejecución del programa se detiene. En la figura 3.4 se muestra la integración de los distintos bloques, para el tiempo de funcionamiento del programa.

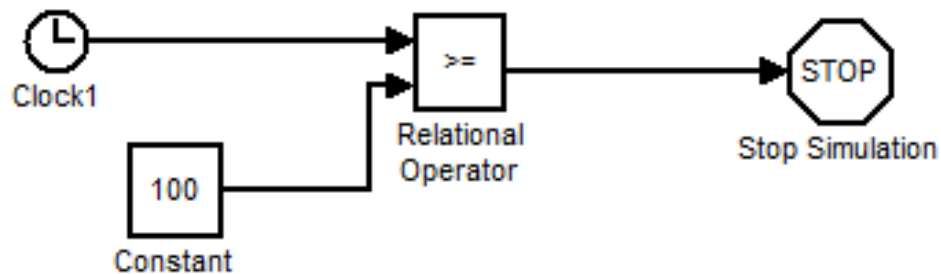


Fig. 3.4 Etapa de tiempo de funcionamiento del programa

3.2.2.3 Adquisición de Datos

Esta etapa se desarrolló con el bloque **Analog Input** de Matlab/Simulink, que funciona como una interfaz de entrada al programa, que nos proporcionara las muestras adquiridas para el procesamiento con distintos bloques de Simulink. En la figura 3.5 se muestra el bloque Analog Input.

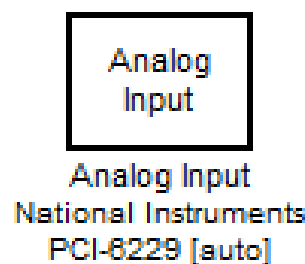


Fig. 3.5 Bloque Analog Input

Debemos configurar este bloque para el uso que se va a dar, por lo cual se tuvo que cambiar una serie de parámetros, que son los siguientes.

- **Seleccionar la tarjeta de Adquisición de Datos:** En este caso fue la de National Instruments PCI-6229, porque es la tarjeta que se encuentra instalada en la PC y que se va usar para el desarrollo del sistema.
- **Frecuencia de Muestreo:** Se ingresó una frecuencia de muestreo de 1Khz ya que la frecuencia con la que trabaja la bomba centrífuga es de 57.5Hz y la Frecuencia de Muestreo debe ser mayor a 2 veces la frecuencia central, además la tarjeta que empleamos solo trabaja con frecuencia de muestreo múltiplos de 10 y por eso la frecuencia de muestreo fue de 1Khz, ya que es suficiente para el desarrollo del sistema.
- **Canales de Entrada:** Se ingresó un solo canal, que pudo ser cualquier canal de entrada de la tarjeta, porque solo se va adquirir una señal.
- **Rango de Entrada:** El rango de entrada seleccionado fue de -10 a 10 V, porque la señal adquirida en su valor máximo era mayor a 5v.
- **Señal de salida del Bloque:** Voltios, porque es igual a la magnitud de la señal de entrada del bloque.
- **Tipo de señal de salida de Bloque:** El seleccionado fue tipo Double.

3.2.2.4 Diseño del Filtro Digital

Esta etapa se trabajó con el bloque Digital Filter Design de Matlab/Simulink, que nos permite utilizar distintos filtro para el desarrollo del sistema. La bomba centrífuga trabaja a una velocidad de 3450rpm, que en frecuencia corresponde a 57.5 Hz, los picos generados a partir de la vibración de la bomba centrífuga corresponde a esa frecuencia y sus armónicos.

En el desarrollo de este problema, se utilizó 4 filtros pasabanda, el primer filtro se encarga de detectar la presencia de un pico correspondiente a la frecuencia de rotación del eje, el segundo filtro de la detección del pico en el segundo armónico, el tercer filtro de la detección del pico en el tercer armónico y el cuarto filtro de la detección del pico en el cuarto armónico, no se hace uso de más filtros debido a que en las pruebas realizadas no se

encontró picos de gran amplitud en los siguientes armónicos. En la figura 3.6 se muestra la conexión de los 4 filtros pasabanda en paralelo, que luego se suman, para formar un solo filtro para la señal adquirida.

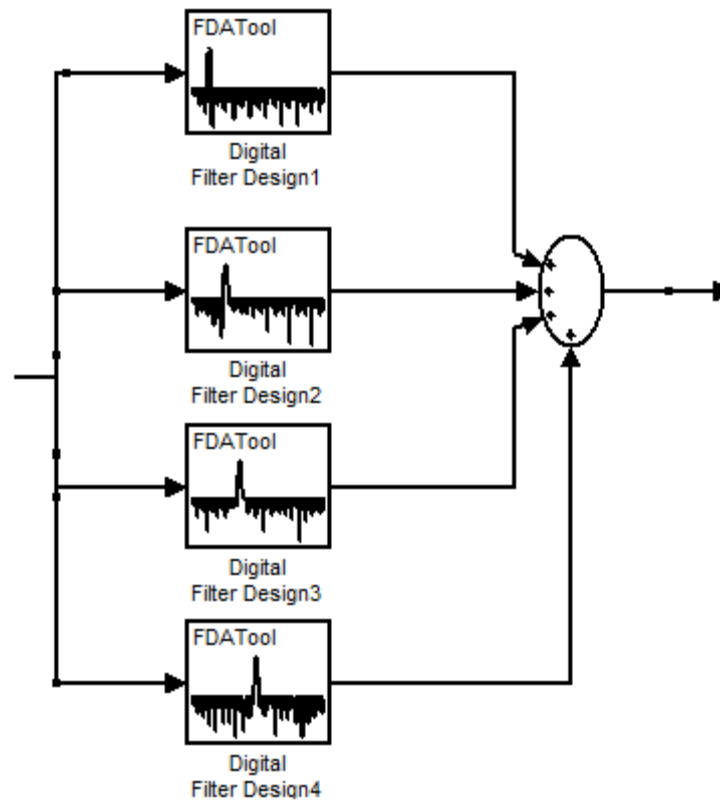


Fig. 3.6 Bloque Digital Filter Design

Los parámetros configurados para cada bloque Digital Filter Design son los siguientes:

- Digital Filter Design 1
 - Tipo de Filtro: Pasabanda
 - Método usado en el Filtro: FIR Equiripple
 - Especificaciones de Frecuencia
 - Unidad: Hz
 - Frecuencia de Muestreo: 1000 Hz
 - Fstop1: 50 Hz
 - Fpass1: 60 Hz
 - Fpass2: 60 Hz
 - Fstop2: 70Hz
 - Orden de Filtro: Orden Mínimo

- Digital Filter Design 2
 - Tipo de Filtro: Pasabanda
 - Método usado en el Filtro: FIR Equiripple
 - Especificaciones de Frecuencia
 - Unidad: Hz
 - Frecuencia de Muestreo: 1000 Hz
 - Fstop1: 110Hz
 - Fpass1: 120 Hz
 - Fpass2: 120 Hz
 - Fstop2: 130 Hz
 - Orden de Filtro: Orden Mínimo
- Digital Filter Design 1
 - Tipo de Filtro: Pasabanda
 - Método usado en el Filtro: FIR Equiripple
 - Especificaciones de Frecuencia
 - Unidad: Hz
 - Frecuencia de Muestreo: 1000 Hz
 - Fstop1: 170 Hz
 - Fpass1: 180 Hz
 - Fpass2: 180 Hz
 - Fstop2: 190 Hz
 - Orden de Filtro: Orden Mínimo
- Digital Filter Design 1
 - Tipo de Filtro: Pasabanda
 - Método usado en el Filtro: FIR Equiripple
 - Especificaciones de Frecuencia
 - Unidad: Hz
 - Frecuencia de Muestreo: 1000 Hz
 - Fstop1: 230 Hz
 - Fpass1: 240 Hz
 - Fpass2: 240 Hz
 - Fstop2: 250 Hz
 - Orden de Filtro: Orden Mínimo

3.2.2.5 Análisis de la Señal

En esta etapa se hace uso de dos bloques, que fueron: Buffer y Magnitude FFT, de Matlab/Simulink. En la figura 3.7 se muestra los dos bloques Buffer y Magnitude FFT.

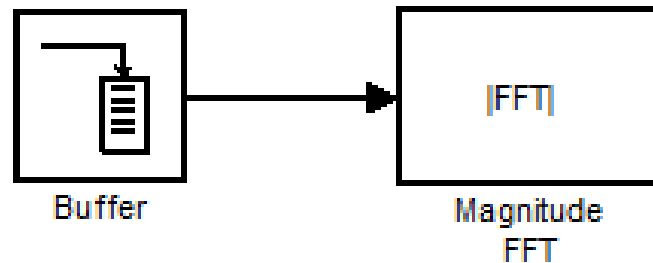


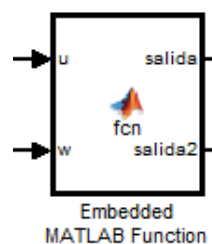
Fig. 3.7 Bloques de Buffer y Magnitud FFT

El primero se encarga de redistribuir los datos que ingresan en este bloque que va ser de 1024 datos, luego entrega los mismos al segundo bloque, que se va usar para hallar la FFT (Transformada Rápida de Fourier), en el cual se tiene que modificar los siguientes parámetros:

- **Salida del Bloque:** Magnitud
- **Longitud:** 1024, porque el Buffer nos va a entregar 1024 datos.

3.2.2.6 Función de Detección de Picos y Estado de la Bomba Centrifuga

Este bloque denominado Embedded MATLAB Function, nos permite desarrollar un código en C, que determine el estado de funcionamiento y el tipo de falla que está ocurriendo en la bomba centrifuga, a partir de los datos entregados por el bloque Magnitud FFT. En la figura 3.8 se muestra el bloque Embedded MATLAB Function.



3.8 Bloque de Embedded MATLAB Function

Este bloque cuenta con 2 entradas, la entrada U es la señal de la vibración entregada por la bomba centrífuga, que salen del bloque Analog Input; mientras que la entrada W, recibe los datos que son entregados por el bloque Magnitude FFT. Nos entrega 2 salidas, salida 1 indicara el estado de funcionamiento de la bomba centrífuga y salida2, el tipo de falla que está ocurriendo en la bomba centrífuga.

El código realizado para determinar el estado de funcionamiento y el tipo de falla que está ocurriendo en la bomba centrífuga se tiene el siguiente diagrama de flujo (Ver fig. 3.9):



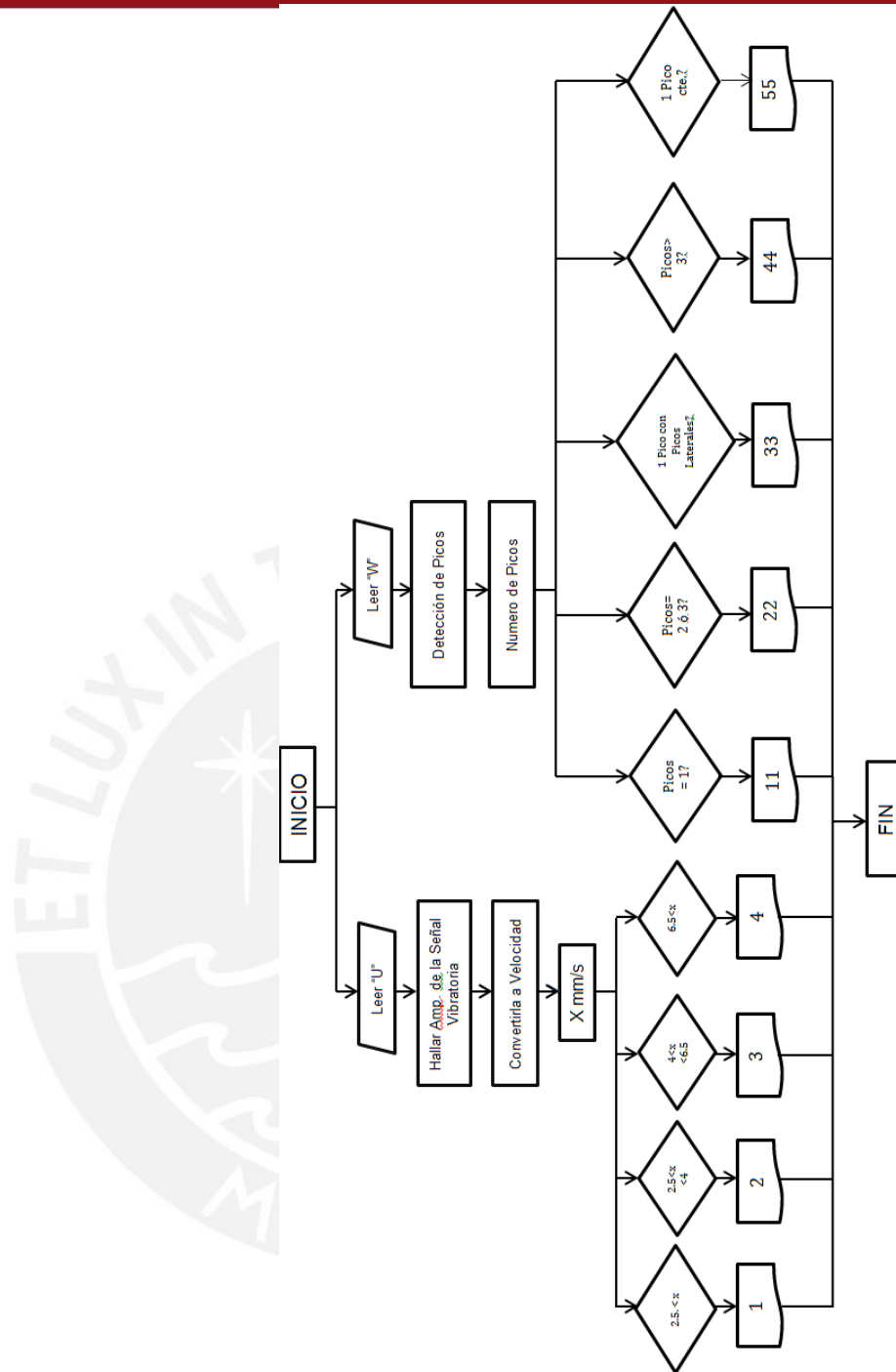


Fig. 3.9 Diagrama de Flujo del código de detección de Fallas

Como se muestra en la figura 3.9, se realizan dos funciones, la primera función nos permitirá conocer el estado de funcionamiento de la bomba centrífuga, a partir de la norma de Vibración DIN ISO 10816-7, se eligieron los rangos de velocidad de la señal de vibración, a partir de la potencia con que trabaja la bomba centrífuga, esta función nos entregara 4 posibles resultados: 1, 2, 3 ó 4, cada número indica en qué estado de funcionamiento

se encuentra la bomba centrífuga. El estado que indica cada número es el siguiente:

1. Maquinas recientemente puestas en operación
2. Operación a largo plazo sin restricciones
3. Operación a largo plazo con restricciones
4. Vibraciones que causan daños.

La otra función del programa principal se encarga de detectar el tipo de falla que está ocurriendo en la bomba centrífuga, a partir del análisis vibracional, esta función nos entregara 4 posibles resultados: 11, 22, 33, 44 y 55, cada número indica que tipo de falla está ocurriendo. La falla que indica cada número es el siguiente:

11. Desbalanceo
22. Desalineamiento
33. Falla Electrica-Rotor
44. Rodamiento
55. Cavitación

3.2.2.7 Muestra de Resultados

Los resultados se van a mostrar en el bloque Display, el bloque Display1 corresponde al estado de funcionamiento de la bomba centrífuga y a la salida1, mientras que el Display2 a la salida2 y corresponde al tipo de falla que está ocurriendo, los resultados mostrados serán numéricos y cada uno tiene un significado como se detalló en 3.2.2.6. En la figura 3.10 se muestran los 2 displays.

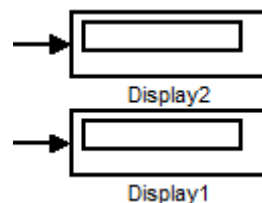


Fig. 3.10 Displays que muestran los resultados

4 Pruebas y Resultados Obtenidos

4.1 Pruebas Usando un Generador de Señal

Se realizó pruebas con un generador de señal FLUKE PM51 (Ver figura 4.1), que nos entrega distintas señales, las cuales son similares a las de una bomba centrífuga cuando presenta falla.

Además, se busca que la función de detección de picos funcione de manera adecuada, para poder determinar el tipo de falla que ocurriese en una bomba centrífuga, de acuerdo a los picos que se presenten en la FFT de las señales.

Las señales generadas fueron las siguientes:

Senoidal, la cual representa a una señal que entrega la bomba centrífuga cuando ocurre una falla de desbalanceo. Se configuró con los siguientes parámetros:

- Frecuencia: 60 Hz
- Amplitud: 1Vpp

La FFT, que corresponde a esa señal se muestra en la figura 4.1:

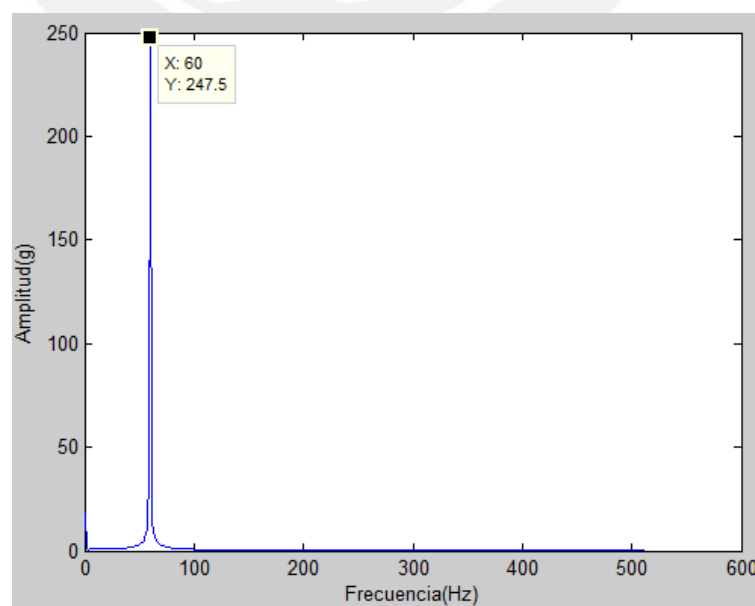


Fig. 4.1. FFT de una señal Senoidal

En la figura 4.1, se muestra un pico a la frecuencia de 60Hz, corresponde a la frecuencia de la señal generada, simulando una falla de desbalanceo.

Diente de sierra, la cual representa a una señal que entrega la bomba centrífuga cuando ocurre una falla de desalineamiento o falla en el eje de la bomba centrífuga. Esta se configuro con los siguientes parámetros:

- Frecuencia: 60 Hz
- Amplitud: 1Vpp

La FFT, que corresponde a esa señal se muestra en la figura 4.2:

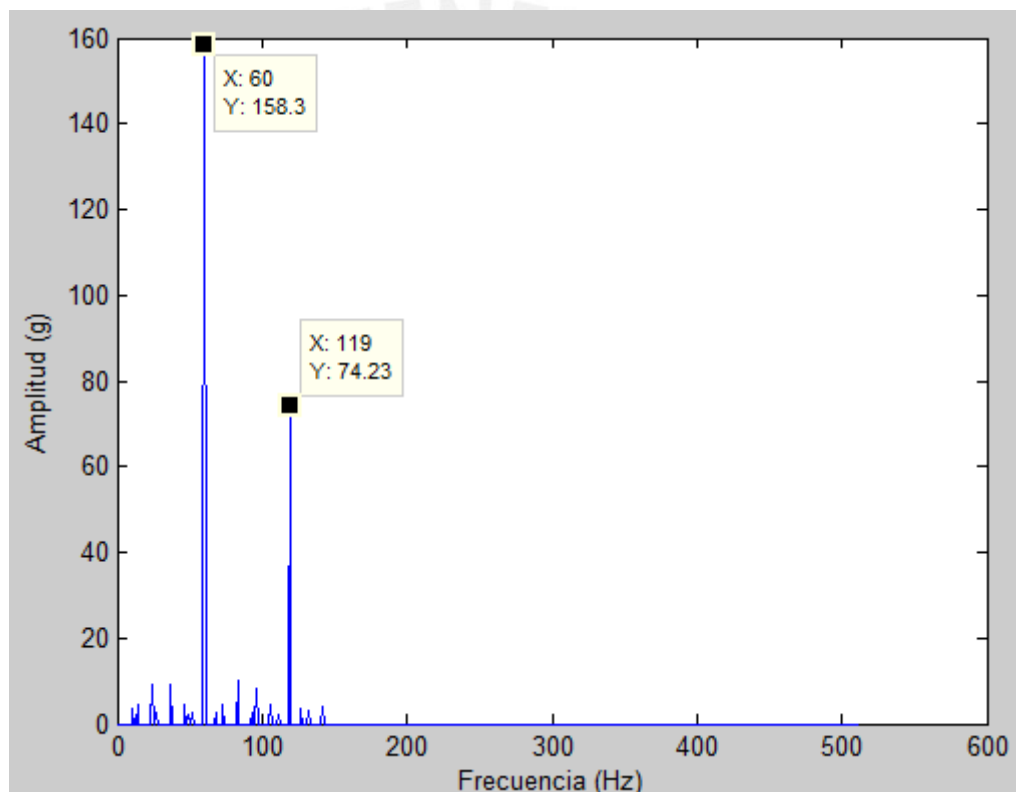


Fig. 4.2 FFT de una Señal Diente de Sierra

En la figura 4.2, se muestra que se generan dos picos a las frecuencias de 60Hz y 119Hz, que es cercana a 120Hz, que sería la segunda armónica, ya que la frecuencia de la señal generada es de 60Hz, simulando una falla de desalineamiento o falla en el eje.

Amplitud Modulada, la cual representa a una señal que entrega la bomba centrífuga cuando ocurre una falla de eléctrica (rotor). Esta se configuro con los siguientes parámetros:

- Frecuencia: 57.5 Hz
- Amplitud: 1Vpp
- Tipo: AM

La FFT, que corresponde a esa señal se muestra en la figura 4.3:

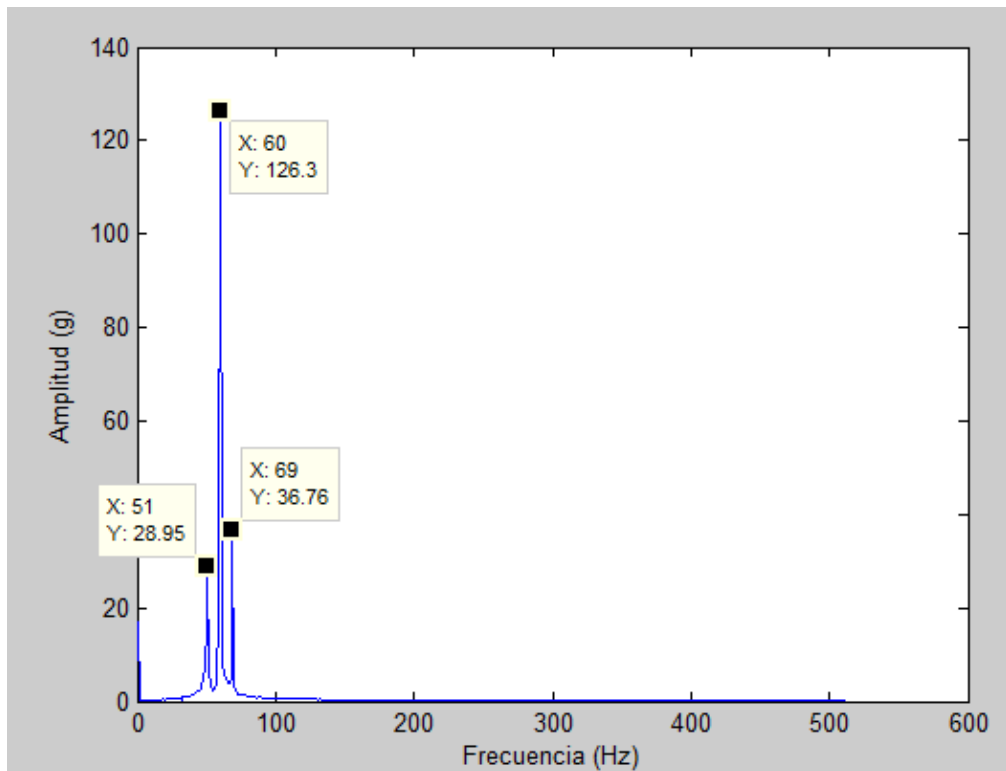


Fig. 4.3 FFT de una señal AM

En la figura 4.3, se muestra la presencia de un pico central de gran amplitud correspondiente a 60Hz, además de la presencia de dos picos laterales que son equidistantes a la frecuencia central y de amplitudes parecidas.

Simulando una falla eléctrica, en el rotor.

Diente de Sierra menor frecuencia, la cual representa a una señal que entrega la bomba centrífuga cuando presenta una falla de desbalanceo. Esta se configuró con los siguientes parámetros:

- Frecuencia: 20 Hz
- Amplitud: 1Vpp

La FFT, que corresponde a esa señal se muestra en la figura 4.4:

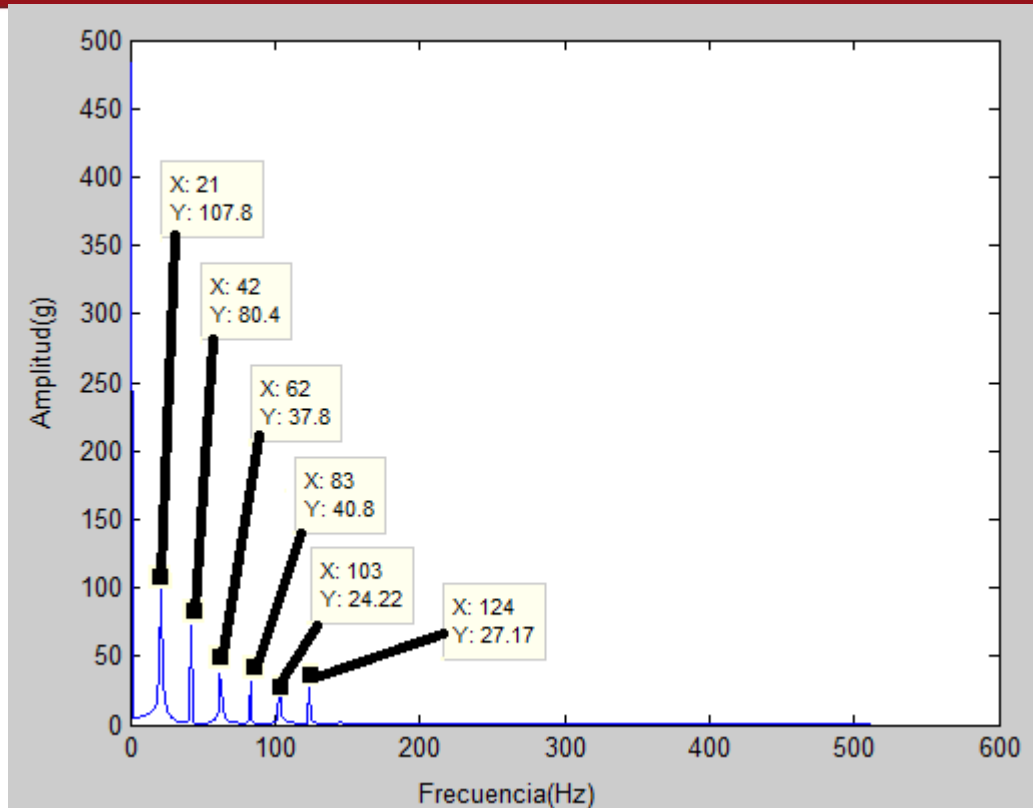


Fig. 4.4. FFT de una señal Diente de Sierra-20Hz

En la figura se muestra que se generan varios picos a las frecuencias de 20, 40, 60 y 80Hz, que corresponden a los armónicos de la frecuencia de la señal generada, simulando de esta forma una falla en rodamientos.

4.2 Pruebas de Funcionamiento del Acelerómetro

Se realizó una serie de pruebas para ver el funcionamiento del acelerómetro, en primer lugar se implementó una fuente de alimentación para proporcionar corriente eléctrica (2mA-4mA) al transductor y que este funcione. En la figura 4.6. Se muestra el esquema de la fuente de alimentación del transductor.

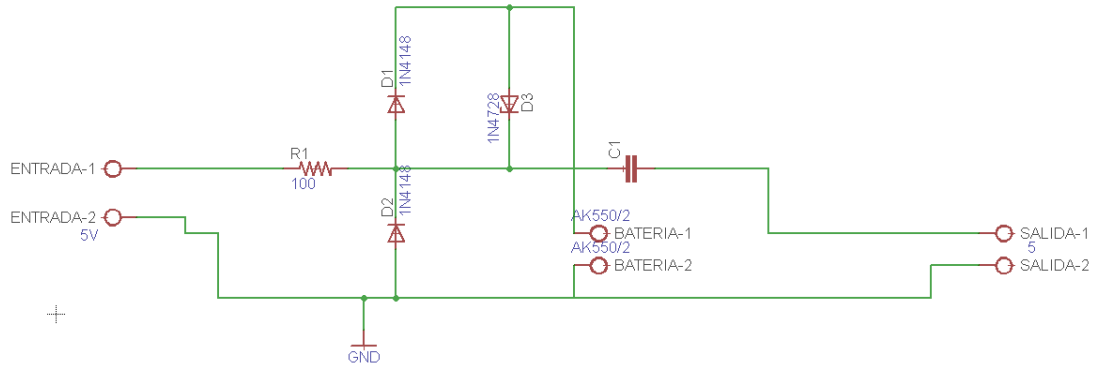


Fig. 4.6 Esquemático de Fuente de Alimentación de Acelerómetro

En la figura 4.7 se muestra la implementación del circuito

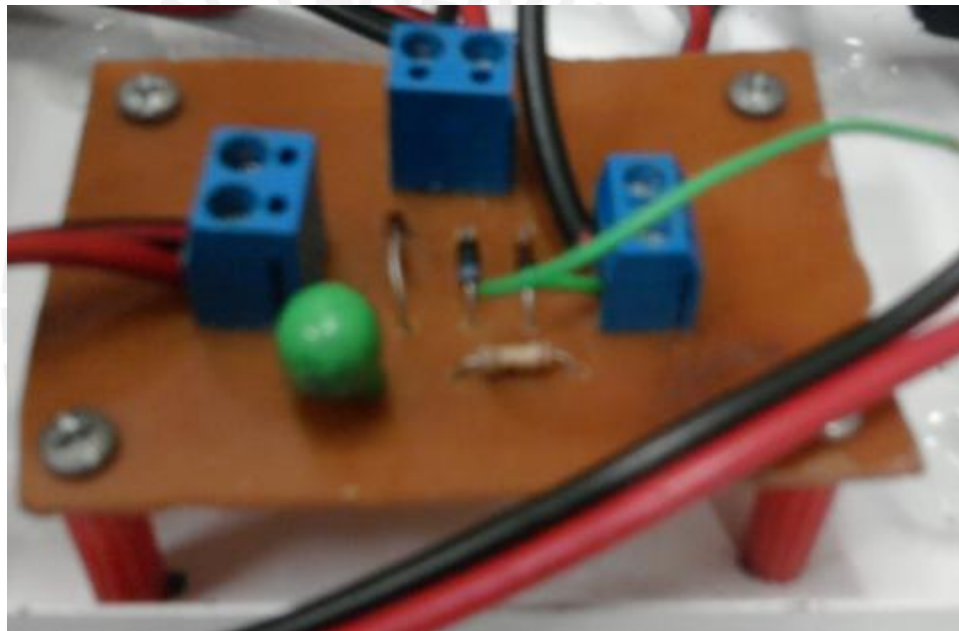


Fig. 4.7 Implementación de la fuente de alimentación del Acelerómetro

En la figura 4.8 se muestra el chasis de la fuente de alimentación del acelerómetro.



Fig. 4.8 Chasis de fuente de alimentación del Acelerómetro

La figura 4.8 muestra el resultado al mover el transductor, con lo cual se concluye que el circuito se implementó de manera correcta y que el acelerómetro está funcionando, además de poder montarlo en la bomba centrífuga para el análisis vibraciones.

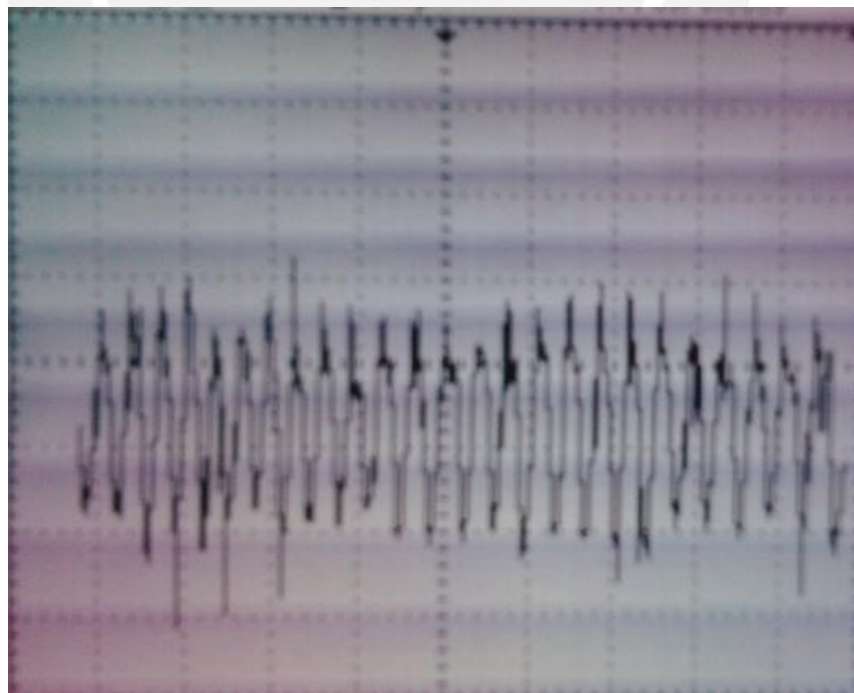


Fig. 4.9 Funcionamiento del Acelerómetro al moverlo manualmente

4.3 Pruebas en Bomba Centrífuga de planta de nivel

Luego de haber probado el funcionamiento del acelerómetro y realizado el programa de detección de fallas se procede a montar el acelerómetro en una bomba centrífuga, que se encuentra en una planta de nivel, además esta bomba centrífuga ya lleva tiempo funcionando.

En la figura 4.10 se muestra el montaje del acelerómetro en la bomba centrífuga, que se colocó en el eje Axial debido a que se obtuvo mejores resultados en la FFT.



Fig. 4.10 Montaje del Acelerómetro en la Bomba Centrífuga

En la figura 4.11, se aprecia que existen dos picos de gran amplitud, que se presentan a 60 Hz y 124 Hz, que corresponden a la primera y segunda armónica de la velocidad a la que trabaja la bomba centrífuga y un pico en la tercera armónica, que no será tomado en cuenta debido a que es pequeño, de manera experimental se corroboró que la falla que existe en esa bomba es de fallas en el eje.

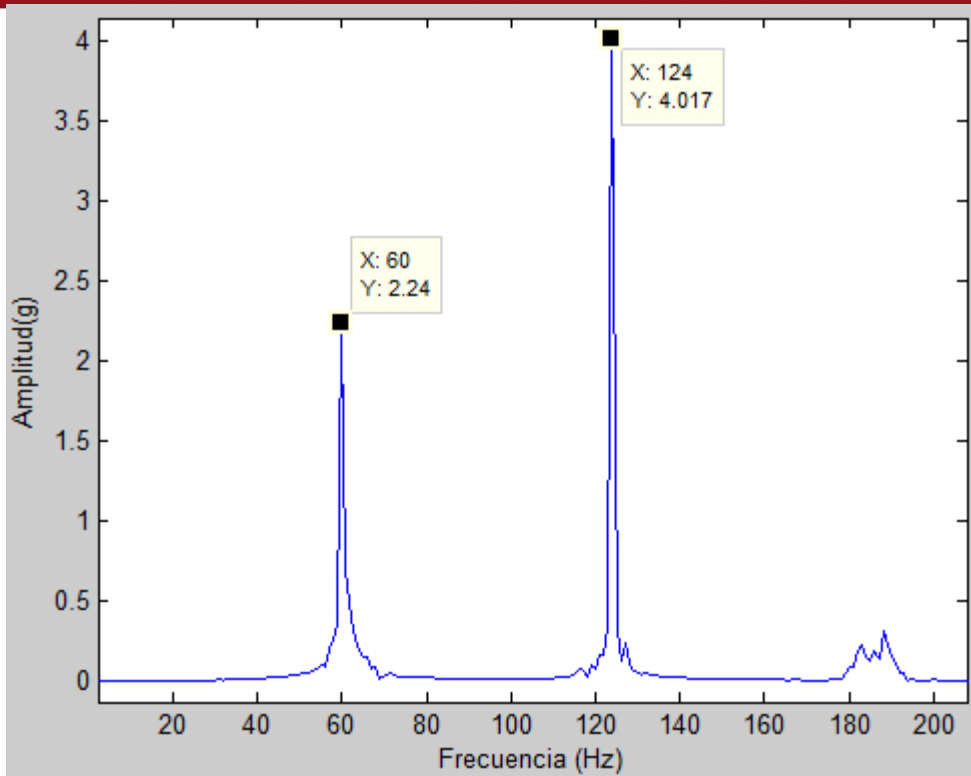


Fig. 4.11 FFT de la señal vibratoria de la Bomba Centrífuga

En la figura 4.12, se muestra otra prueba realizada en esa bomba centrífuga.

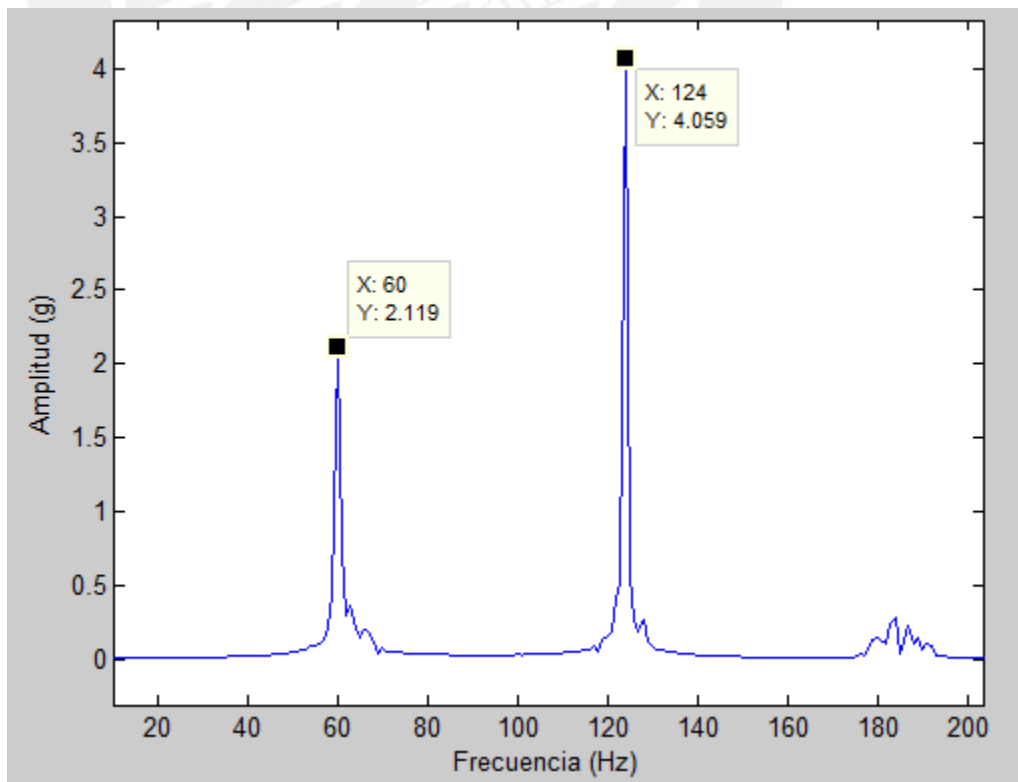


Fig. 4.12 Segunda FFT de la señal vibratoria de la Bomba Centrífuga

En lo que respecta al estado de funcionamiento de la Bomba Centrífuga la velocidad de vibración de la bomba centrífuga era mayor a 2.5 mm/s y menor a 4 mm/s, en las pruebas realizadas, por lo cual puede operar largamente sin restricciones.

4.4 Pruebas en Bombas Centrífugas de Planta Intercambiador de Calor

Finalmente se realizó las pruebas en la planta Intercambiador de calor, en la cual se tenía que detectar el tipo de falla que estaba ocurriendo en la bomba centrífuga.

En la figura 4.13 se muestra el montaje del acelerómetro en la bomba centrífuga, que se colocó en el eje Axial debido a que se obtuvo mejores resultados en la FFT.



Fig. 4.13 Montaje del Acelerómetro en la Bomba Centrífuga

En la figura 4.14, se aprecia que existen dos picos de gran amplitud, que se presentan a 58 Hz y 120 Hz, que corresponden a la primera y segunda armónica de la velocidad a la que trabaja la bomba centrífuga y un pico en la tercera armónica, que no será tomado en cuenta debido a que es pequeño, de manera experimental se corroboró que la falla que existe en esa bomba

es de fallas en el eje. En lo que respecta al estado de funcionamiento de la Bomba Centrífuga la velocidad de vibración de la bomba centrífuga era mayor a 2.5 mm/s y menor a 4 mm/s en las pruebas realizadas, por lo cual puede operar largamente sin restricciones

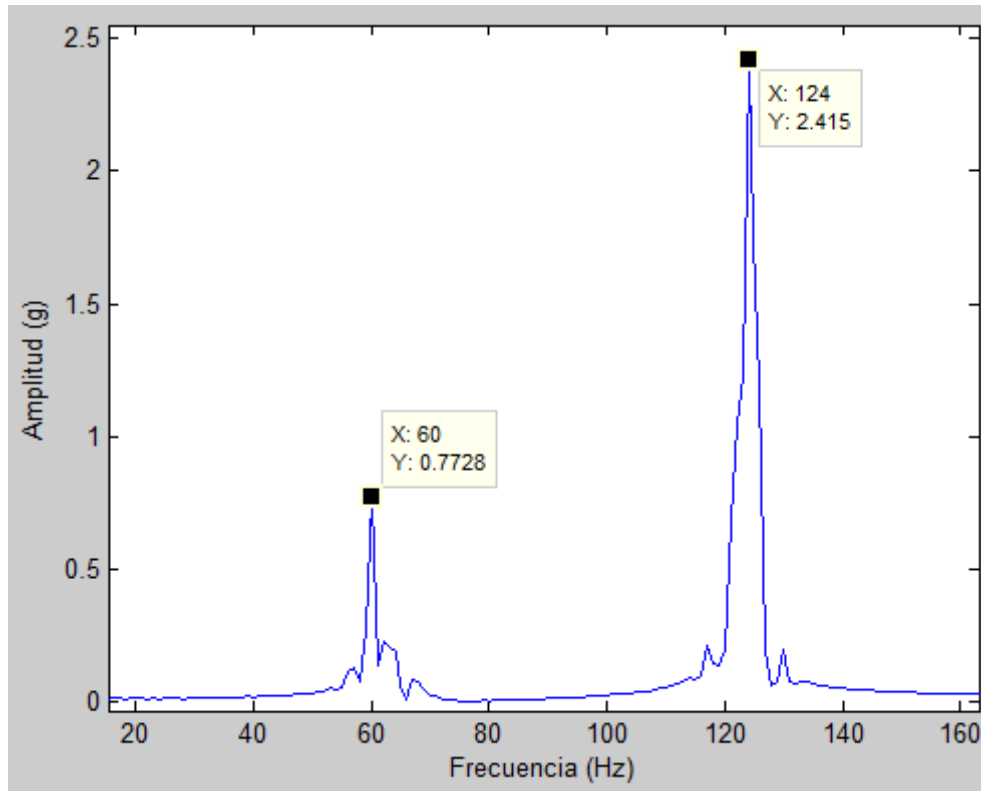


Fig. 4.14 FFT de la señal vibratoria de la Bomba Centrífuga de la Planta Intercambiador de calor

Como se aprecia en la gráfica, los picos obtenidos de la señal vibratoria de la bomba centrífuga de la Planta Intercambiador de Calor, son de menor amplitud que la obtenida de la bomba centrífuga de la Planta de Nivel, esto se debe a que la bomba del intercambiador de calor tiene un menor uso que la otra bomba, por eso la diferencia de amplitud.

4.5 Análisis y Resultados Obtenidos

En las pruebas realizadas se obtuvieron distintos resultados, que son mostrados en la tabla 4.1, donde se detalla en que planta se realizó las pruebas de la bomba centrífuga, los números de picos, la frecuencia en donde ocurren y la amplitud de la misma, a partir de las señales vibratorias de la bomba centrífuga.

			BOMBA CENTRIFUGA			
			Bomba Centrífuga de Planta Control de Flujo		Bomba centrífuga de Planta Intercambiador de Calor	
	Numero de Picos	Pico	Frecuencia (Hz)	Amplitud (g)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (g)
Prueba 1	2	1	60	2.24	60	1.012
		2	124	4.017	123	2.134
Prueba 2	2	1	60	2.119	60	0.9679
		2	124	4.059	121	2.082
Prueba 3	2	1	59	1.28	60	0.8187
		2	124	3.271	121	2.47
Prueba 4	2	1	59	1.418	60	0.7728
		2	124	3.187	121	2.415
Prueba 5	2	1	60	2.014	60	0.4888
		2	124	4.189	121	1.883
Prueba 6	2	1	60	2.022	60	0.9381
		2	122	3.181	122	1.801
Prueba 7	2	1	60	2.199	60	0.9381
		2	123	4.291	124	1.801
Prueba 8	2	1	60	1.824	60	0.6729
		2	123	3.321	124	2.358
Prueba 9	2	1	60	1.745	59	0.816
		2	123	3.608	124	1.214
Prueba 10	2	1	60	2.24	60	0.7991
		2	123	4.017	124	2.588

Tabla 4.1. Resultados de las Pruebas realizadas

Al analizar los resultados obtenidos, los picos ocurren entre el 90 y 110%, de la frecuencia y armónicos de la velocidad a la que trabaja la bomba centrífuga, además la amplitud de los picos obtenidos a partir del método de análisis vibracional en la Planta de Control de Flujo, fueron más grandes que el de la Planta Intercambiador de Calor, porque esta tiene un menor tiempo de funcionamiento que la anterior.

Además esto se corrobora con la velocidad de vibración que tenía la bomba centrífuga de la Planta de Control de Flujo, porque esta era mayor que el de la Planta Intercambiador de Calor, debido a su tiempo de funcionamiento.

Los resultados que se obtuvieron fueron los esperados, ya que se demostró mediante el método de análisis vibracional que la falla que ocurre en las dos bombas centrífugas, era el de alineamiento y el estado en que se encontraban las dos, era que podían operar largamente.

CONCLUSIONES

El sistema de Diagnóstico de Fallas para la Bomba Centrífuga, desarrollado detecta de manera correcta, la falla de desalineamiento en las bombas centrífugas estudiadas.

Se realizó el estudio de funcionamiento de bombas centrífugas y se eligió los elementos y método necesario, para llevar a cabo el diseño de un Sistema de Detección de Fallas para estas.

El método de análisis vibracional aplicado a detección de fallas en bomba centrífuga, permitió comprobar el estudio de funcionamiento de estas. Se comprobó su efectividad en simulaciones.

Se implementó el Sistema desarrollado en las bombas centrífugas del laboratorio de Control y Automatización. En los casos estudiados se comprobó que la bomba centrífuga de la planta de Control de Flujo, de mayor tiempo de uso sin mantenimiento, evidencia mayor desalineamiento que la bomba centrífuga de la Planta Intercambiador de Calor.

RECOMENDACIONES

Se recomienda hacer las pruebas en otras bombas centrífugas para analizar las distintas fallas que se puedan presentar en estas.

Se recomienda hacer uso de un Generador de Señales Arbitrarias que nos entregue señales similares a los de una bomba centrífuga, para realizar las pruebas con el programa realizado y corroborar el funcionamiento de la misma.



BIBLIOGRAFIA

[1] Vibratec

Análisis de Vibraciones. Ecuador: Vibratec S.A.

Consulta: 3 de setiembre de 2012

http://www.vibratec.net/pages/tecnico_desbalance.html

[2] María C. Trujillo Arribas

Análisis de vibraciones en auxiliares de MACI*. España

Consulta 15 de julio de 2012

http://zaguan.unizar.es/TAZ/CPS/2010/4732/TAZ-PFC-2010-082_ANE.PDF

[3] Sinai

Tecnologías aplicables al mantenimiento predictivo

Consulta 5 de abril de 2012

http://www.sinais.es/intro/tecnologias_predictivas.html

[4] National Instruments

Sistema de Evaluación y Diagnostico de Maquinas Rotativas mediante

Análisis de Vibraciones

Consulta 15 de noviembre de 2012

<http://www.ni.com>

[5] Jesús A. Royo, Gloria Rabanaque, Fernando Torres

Análisis de vibraciones e interpretación de datos. España

Consulta: 15 de julio de 2012

<http://www.guemisa.com/articul/pdf/vibraciones.pdf>

[6] Sinai

Transductores y su tipología. España

Consulta 21 de agosto de 2012

<http://www.sinais.es/sensores/transductores.html>

[7] Sinai

Transductores de desplazamiento

Consulta 21 de agosto de 2012

http://www.sinais.es/sensores/transductores_desplazamiento.html

[8] Sinai

Transductores de desplazamiento

Consulta 21 de agosto de 2012

http://www.sinais.es/sensores/transductores_desplazamiento.html

[9] Sinai

Transductores sísmicos de velocidad

Consulta 21 de agosto de 2012

http://www.sinais.es/sensores/transductores_desplazamiento.html

[10] Eduardo Bayona Blanco

Atlas de aceleraciones del cuerpo humano en movimiento de carrera y trabajo en escaleras

Consulta 30 de noviembre de 2012

<http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/613/344728.pdf?sequence=1>

[11] VISHAY

Current Regulator Diodes

Consulta 1 de setiembre de 2012

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/vishay/70195.pdf>

[12] Azimadli

Introducción al análisis de vibraciones

Consulta 20 de setiembre de 2012

<http://support.azimadli.com/vibman-spanish/porquellevaracabounanlisisdefrecuencia.htm>

[13] Azimaldi

Introducción al análisis de vibraciones

Consulta 20 de setiembre de 2012

<http://support.azimadli.com/vibman-spanish/elconceptodefase.htm>

[14] Sinai

Vibración Simple

Consulta 20 de setiembre de 2012

http://www.sinais.es/fundamentos/vibracion_simple.html

[15] Ramon Ramirez Carreras

Hipertexto Web sobre Energía Eólica

Consulta 30 de octubre de 2012

<http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/41/tema15/tema15-4.htm>

[16] PUMPS&SYSTEMS

Pump Vibration Analysis

Consulta 30 de octubre de 2012

<http://www.pump-zone.com/topics/instrumentationcontrols/pump-vibration-analysis>

[17] Tecsup Virtual

Bombas Centrifugas y Curvas de Bombas. Perú: Tecsup

Consulta: 10 de Junio de 2012

<http://es.scribd.com/doc/39167108/05-Bombas-Centrifugas-y-Curvas-de-Bombas>

[18] Ademinsac

Manual de Análisis Vibracional Nivel II

Consulta: 6 de abril de 2012

<http://es.scribd.com/doc/23243083/Manual-de-Analisis-Vibracional-Nivel-II>

[19] Dr. Evelio Palomino Marín

Curso de Análisis de Vibración: La medición y el análisis de vibración en el diagnóstico de máquinas rotativas. España: Renovetec

Consulta: 12 de junio de 2012

<http://es.scribd.com/doc/14467595/analisisvibraciones>

[20] Francisco Javier Botero Herrera, Leonel Castañeda Heredia (2006)

Estado futuro de bombas centrifugas. Metodología de Diagnostico.

Colombia: Universidad Eafit

Consulta: 2 de mayo de 2012

[21] Carsten Skovmose, Vincent Cocquempot y Roozbeh Izadi-Zamanabadi

2006 Model Based Fault Detection in a Centrifugal Pump Application. En:

IEEE transactions on control systems technology, Volumen 14 No. 2,
pp. 204-215.

[22] P. Giridhar Kini, Ramesh C. Bansal y R. S. Aithal

2008 Performance Analysis of Centrifugal Pumps Subjected to Voltage
Variation and Unbalance. En: IEEE transactions on Industrial
Electronics,

Volumen: 55 No 2, pp. 562-569

[23] N.R. Sakthivel, Binoy. B. Nair y V. Sugumaran

2012 Soft computing approach to fault diagnosis of centrifugal pump. En:

Applied Soft Computing 12, pp. 1574-1581

[24] V. Muralidharan y V. Suguraman

2012 Feature extraction using wavelets and classification through decisión
tree algorithm for fault diagnosis of mono-block centrifugal pump. En:

Measurement 46, pp. 353-359

- [25] A. Albraik, F. Althobiani, F. Gu and A. Ball
2012 Diagnosis of Centrifugal Pump Faults Using Vibration Methods En:
En: 25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic
Engineering, pp.1-13.
- [26] P. Henriquez, J.B Alonso, M.A. Ferrer, C.M. Travieso y G. Gomez
2012 Fault Diagnosis using Audio and Vibration Signals in a Circulating
Pump.
En: 25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic
Engineering, pp.1-13.
- [27] Pedrollo
2010 Catalogo de Bombas
- [28] CTC
2010 Datasheet Acelerometer

