

**METODOLOGÍA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA DIAGNÓSTICO DE
FALLAS EN BOMBAS HIDRÁULICAS DE PISTONES AXIALES ASOCIADAS
CON DESGASTE DE LOS PLATOS RODANTES DE PRESIÓN**

SERGIO ANDRÉS CASTILLO GÓMEZ

JHOAN RICARDO SERRANO ARIAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2016

**METODOLOGÍA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA DIAGNÓSTICO DE
FALLAS EN BOMBAS HIDRÁULICAS DE PISTONES AXIALES ASOCIADAS
CON DESGASTE DE LOS PLATOS RODANTES DE PRESIÓN**

**SERGIO ANDRÉS CASTILLO GÓMEZ
JHOAN RICARDO SERRANO ARIAS**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

**CARLOS BORRÁS PINILLA
Ingeniero Mecánico Ph.D., MSc.**

Codirector

**PEDRO JOSÉ DÍAZ GUERRERO
Ingeniero Mecánico MSc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

A DIOS que me nunca me desampara, que siempre me guía y me ayuda en todo.

A mis padres Evelina Gómez y Henry Castillo por su incondicional apoyo y comprensión en todos los momentos difíciles, a mi hermana Lina Mayerly y a todos mis demás familiares que de una u otra forma me ayudaron y acompañaron.

A mi amada Leidy Yohana León por su gran amor y paciencia por estar siempre a mi lado en todo este camino.

A mis amigos Ricardo Serrano, Sergio Vera, Cristian Gómez, Víctor Jaimes, Andrés Pico, mis compañeros de la selección de fútbol y todos los demás que de una u otra forma me ayudaron y me divirtieron con su compañía.

Sergio Andrés Castillo Gómez

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía y fortaleza.

A mis padres Carlos Serrano y Orfa Arias por su amor incondicional y apoyo.

A mi Hermano David Serrano por sus consejos y acompañamiento en mi etapa universitaria.

A mis amigos y a toda mi familia por la alegría que brindan a mi corazón y por poner un toque más de felicidad a mi vida.

Jhoan Ricardo Serrano Arias

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la vida y la sabiduría.

A la Universidad Industrial de Santander por su apoyo y la oportunidad de crecer como profesionales.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, a todos y cada uno de los profesores que contribuyeron en este proceso de formación, en especial a nuestro director Carlos Borrás y codirector Pedro Díaz, por su acompañamiento y dedicación en el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Jaime Ricardo y al ingeniero Fabián Díaz por su colaboración oportuna.
A Henry, Gonzalo y Fredy, personal del taller de la escuela de Ingeniería Mecánica.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	19
2. JUSTIFICACIÓN.....	21
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	22
3.1 OBJETIVO GENERAL	22
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
4. MARCO TEÓRICO	24
4.1 REFERENTES TEÓRICOS	24
4.1.1 Bombas Hidráulicas	24
4.1.2 Análisis de Vibraciones Mecánicas.....	28
4.1.3 Mantenimiento Predictivo.....	31
4.1.4 Métodos de Detección de Fallas.....	34
4.1.5 Métodos de Diagnóstico de Fallas	38
4.1.6 Ventana Hanning	40
5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	42
6. REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL FRENO PARA EL BANCO DE PRUEBAS	49
6.1 JUSTIFICACIÓN Y REQUERIMIENTOS	49
6.2 MARCO REFERENCIAL.....	49

6.3 GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS	51
6.4 SELECCIÓN DE ALTERNATIVA	54
6.5 MODELO DE CÁLCULO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	55
6.6 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	59
6.7 ESTIMACIÓN DEL TORQUE	64
6.8 PRUEBAS.....	66
7. SISTEMA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS	70
7.1 CADENA DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	71
7.2 SENSORES Y TRANSDUCTORES.....	72
7.2.1 Caudalímetro	72
7.2.2 Transductores de Presión.....	74
7.2.3 Acelerómetro.....	78
7.3 HARDWARE DAQ	78
7.4 EQUIPO PORTATIL Y SOFTWARE PARA LA AQUISICIÓN DE DATOS.....	80
7.5 DESARROLLO DEL PROGRAMA EN LabVIEW.....	81
7.5.1 Panel Frontal.....	81
7.5.2 Diagrama de Bloques.....	83
8. METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN BOMBAS HIDRÁULICAS DE PISTONES AXIALES	87
8.1 TOMA DE DATOS	87
8.1.1 Configuración del Banco para la toma de Datos.....	87
8.1.2 Metodología para la toma de Datos.....	88
8.2 CONDICIONES DE DESGASTE (FALLAS INDUCIDAS)	90
8.2.1 Comportamiento del caudal de pérdidas según el desgaste.....	94

8.2.2 Comportamiento de la presión según el desgaste	96
8.4 ANÁLISIS DE LOS ESPECTROS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA. ...	97
8.4.1 Especificaciones para el Tratamiento de Datos	97
8.4.2 Espectro Presión de Salida.....	98
8.4.3 Espectro Presión de Precarga	100
8.4.4 Vibraciones Mecánicas	101
8.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	104
9. CONCLUSIONES	107
BIBLIOGRAFÍA.....	108

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Metodos de detección y diagnóstico de fallas usadas comúnmente para sistemas hidráulicos.....	40
Tabla 2. Tabla decisión alternativas.....	55
Tabla 3. Condiciones de desgaste.....	94

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Configuración de bomba de pistones axiales.....	25
Figura 2. Elementos rotantes de una bomba de pistones axiales.....	27
Figura 3. Dominio del tiempo y frecuencia.....	29
Figura 4. Sistema de monitoreo.....	30
Figura 5. Situaciones de las acciones predictivas.....	33
Figura 6. Etapas del proceso de mantenimiento.....	34
Figura 7. Celda de Carga tipo S marca Lexus 1t.....	50
Figura 8. Configuración celda de carga como apoyo.....	51
Figura 9. Dinamómetro.....	52
Figura 10. Esquema freno Prony.....	53
Figura 11. Freno Prony configuración de banda.....	53
Figura 12. Freno Prony Configuración con disco de frenado y celda de carga.....	54
Figura 13. Sistema freno disco motocicleta.....	59
Figura 14. Módulo motor hidráulico con freno de disco.....	60
Figura 15. Placa de apoyo.....	61
Figura 16. Acople eje-disco.....	62
Figura 17. Perforado de elemento que sostiene la celda de carga.....	63
Figura 18. Sistema completo final.....	64
Figura 19. Cálculo del torque.....	65

Figura 20. Calibración celda de carga a compresión.	67
Figura 21. Calibración celda de carga	68
Figura 22. Grafica de torque vs tiempo	69
Figura 23. Cadena general de adquisición de datos	71
Figura 24. Puntos de medición de vibraciones en la bomba	72
Figura 25. Caudalímetro	73
Figura 26. Transductor de Presión WIKA.....	74
Figura 27. Calibración transductor WIKA	75
Figura 28. Calibración Transductor de presión WIKA	76
Figura 29. Transductor de Presión MSI	76
Figura 30. Tarjeta acondicionamiento de señal	77
Figura 31. Calibración transductor	77
Figura 32. Acelerómetro.....	78
Figura 33. NI USB-6216.....	79
Figura 34. NI USB-9234.....	80
Figura 35. Botones Principales Prediseñados del Panel Frontal Principal.....	81
Figura 36. Panel Frontal Principal.....	82
Figura 37. Panel Frontal del Caudalímetro y de la celda de carga	82
Figura 38. Panel Frontal del Transductor de Presión de salida y precarga.....	83
Figura 39. Panel frontal del acelerómetro.	83
Figura 40. Diagrama de Bloques Principal.....	84
Figura 41. Diagrama de Bloques del Transductor de Presión.....	85
Figura 42. Programación para guardar la señal	86

Figura 43. Toma de datos	88
Figura 44. Toma de datos	89
Figura 45. Izquierda: Valve Plate. Derecha: Bearing Plate	90
Figura 46. Rectificado y torneado de los platos	91
Figura 47. Medición de rugosidad	92
Figura 48. Aumento de caudal de pérdidas debido al desgaste.	95
Figura 49. Campana de Gauss para los datos de caudal	95
Figura 50. Nivel de Presión de precarga con las 6 condiciones de desgaste	96
Figura 51. Espectros de presión de salida de las condiciones de desgaste	99
Figura 52. Espectro de presión de precarga para las 6 condiciones.	100
Figura 53. Puntos de captación de la vibración	101
Figura 54. Señales de vibraciones para las seis condiciones	102
Figura 55. Espectros de vibraciones para las diferentes condiciones de desgaste.	103
Figura 56. Comparación de la PSD para la condición 1 y 6.....	104
Figura 57. Desgaste en bearing plate	105

LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1. Características de la celda de carga
- Anexo 2. Planos de diseño
- Anexo 3. Catálogo Acelerómetro
- Anexo 4. Repair Information Eaton
- Anexo 5. Manual de puesta en marcha del banco de pruebas
- Anexo 6. Manual de especificaciones Mitutoyo SJ-210
- Anexo 7. Rugosidad
- Anexo 8. Cambio de platos de desgaste de la bomba
- Anexo 9. Características del transductor MSP300
- Anexo 10. Características del transductor Wika
- Anexo 11. Características flujómetro
- Anexo 12. Métodos de detección y diagnóstico de fallas
- Anexo 13. Costos Generales

NOTA: LOS ANEXOS DE ESTE PROYECTO PUEDEN CONSULTARSE EN LA BIBLIOTECA DE LA UNIVESIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER : SALA BASE DE DATOS

RESUMEN

TÍTULO: METODOLOGÍA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN BOMBAS HIDRÁULICAS DE PISTONES AXIALES ASOCIADAS CON DESGASTE DE LOS PLATOS RODANTES DE PRESIÓN*

AUTORES:

JHOAN RICARDO SERRANO ARIAS

SERGIO ANDRES CASTILLO GOMEZ**

PALABRAS CLAVE: Metodología de mantenimiento predictivo, vibraciones mecánicas, DAQ, FFT, bearing plate, valve plate.

DESCRIPCIÓN

En este trabajo se desarrolla una metodología de diagnóstico de fallas en bombas hidráulicas de pistones axiales, teniendo como objeto de estudio la falla del desgaste en los platos rodantes de presión (bearing plate y valve plate). Para el monitoreo online de la señal se diseñó un programa utilizando el software LabVIEW 2013 y para el procesamiento, estudio y análisis detallado de las señales que se capturaron de la bomba se utilizó la herramienta de programación MATLAB.

Para desarrollar la metodología de diagnóstico para bombas hidráulicas de pistones axiales se captaron y analizaron señales de presión a la salida de la bomba, presión en la precarga, caudal de pérdidas y vibraciones mecánicas. Todo esto en miras de un análisis más completo y concluyente sobre la bomba Eaton 54.

También se presenta una adaptación del banco de pruebas para bombas hidráulicas de pistones axiales que tiene el grupo de investigación DICBOT (Sistemas Dinámicos, Control y Robótica), para habilitar el banco de tal manera que se pueda medir el torque del motor hidráulico en línea. También

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Ing. Carlos Borrás Pinilla.

se presenta una revisión bibliográfica detallada sobre métodos en detección de fallas en sistemas hidráulicos, así como los métodos para diagnóstico de fallas en sistemas hidráulicos de potencia.

ABSTRACT

TITLE: METHOD FOR PREDICTIVE MAINTENANCE TROUBLESHOOTING IN THRUST PISTON HYDRAULIC PUMPS ASSOCIATED WITH WEAR PLATES ROLLING PRESSURE *

AUTHORS:

JHOAN SERRANO RICARDO ARIAS

SERGIO ANDRÉS GÓMEZ CASTILLO **

KEYWORDS: Methodology predictive maintenance, mechanical vibration, DAQ, FFT, bearing plate, valve plate.

DESCRIPTION

This paper presents a methodology for troubleshooting in hydraulic axial piston pumps is developed, aiming to study the wear failure in pressure plates (bearing plate and valve plate). For online monitoring of the signal a program using the LabVIEW 2013 software is developed. For the processing, study and detailed analysis of the signals captured in the pump, a program was desing using the programming tool MATLAB.

To develop a diagnostic methodology a group of signals in strategic points of the pump (pump's output pressure, preload pressure, flow losses and mechanical vibrations) were captured and analyzed. All this in view of a more complete and conclusive analysis of the Eaton pump 54.

An adaptation of the test bench for DICBOT's (Dynamic Systems, Control and Robotics reaserch group) hydraulic pumps, for measuring the online torque of the hydraulic motor is also presented.

* Project of grade.

** Faculty of Physical – Mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Director Ing. Carlos Borrás Pinilla.

A detailed literature review in troubleshooting and fault diagnosis methods for hydraulic systems is developed.

INTRODUCCIÓN

La bomba es un mecanismo que convierte energía mecánica en energía hidráulica a través de un fluido incomprensible que se desplaza. Las bombas de pistones axiales son bombas de desplazamiento positivo utilizadas generalmente, en aplicaciones oleo hidráulicas debido a su alta presión de descarga, además de su variabilidad de flujo y fácil control. Al ser un componente importante en los sistemas, merece un seguimiento especial para el mantenimiento.

Este tipo de bombas son ampliamente usadas en sistemas de potencia hidráulica y además en maquinaria pesada por lo que son de amplio uso y merecen su estudio.

La bomba hidráulica de pistones axiales es un equipo complejo y delicado, así como costoso por lo que su cuidado y mantenimiento debe ser especial, obviamente, tratándose de un componente fundamental de un sistema de potencia hidráulica, debería ser por tanto objeto de un método especial de atención y monitoreo, pues una parada o una falla inesperada provocaría una interrupción en el trabajo que desempeñe el sistema.

El mantenimiento predictivo se ajusta a esas necesidades, pues en sus procedimientos mide, hace seguimiento y monitorea las variables físicas que permiten realizar un diagnóstico de falla en la bomba, asimismo puede relacionar el estado de la bomba o una falla de la misma con una de las variables controladas. Esta ventaja permite que se realice un seguimiento cercano al equipo sin necesidad

de abrirlo para conocer su estado interno, lo que supone un control eficiente pues no se desperdicia tiempo ni recursos en paradas sistemáticas para revisiones, ni tampoco se deja llevar el equipo hasta una situación de ruptura o de falla abrupta. El mantenimiento predictivo es una práctica necesaria para toda industria que busca optimizar la producción y la disponibilidad en los equipos.

La importancia del mantenimiento se ve enfatizada cuando los factores como la inversión económica, la complejidad de los equipos o grandes producciones están involucrados, pues se puede perder mucho dinero tanto en depreciación de equipos o paradas de planta que afectan la producción. Por ese motivo el mantenimiento predictivo al ser de los más ventajosos, es también un objeto de investigación y análisis académico.

Una falla siempre se antecede por distintas señales o avisos por parte de la máquina. Estos avisos son transmitidos a través de unas variables físicas, por tanto, al caracterizar en distintos estados las variables físicas, se podría conocer el estado real de la máquina. Estas variables físicas pueden ser por ejemplo, la temperatura, presión, aceleración, sonido, etc.

Este proyecto, se enfocará en tres variables físicas, a saber: aceleración, caudal, y presión. Este trabajo se orienta en analizar las vibraciones mecánicas para una bomba hidráulica de pistones axiales, para así relacionarlas con fallas afines a desgaste en los platos rodantes de presión de la bomba, también se medirá caudal del pérdidas y presión de salida de la bomba como parte de un análisis más completo.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En un sistema hidráulico el componente más importante es la bomba. Es la que se encarga de suministrar la potencia al fluido, y su presencia dentro de un sistema hidráulico es esencial. Mantener la bomba en condiciones tales que funcione con alta eficiencia es trascendental.

Tras el funcionamiento viene el mantenimiento, que por razones logísticas y económicas se debería realizar en el momento que sea más oportuno; cuando la eficiencia volumétrica baje tanto que no sea conveniente seguir usándola así, y además de tal forma que no sea cuando más se le necesite en óptimas condiciones para la producción. La idea es reducir los costos y aumentar la productividad y la disponibilidad.

El realizar paradas periódicas (mantenimiento preventivo) por el hecho de revisar el estado de los elementos internos rodantes de la bomba, no es para nada eficiente ni barato, y muchas de estas paradas son injustificadas, se pierde mucho tiempo, dinero y producción, también se pueden inducir fallas involuntarias al destapar elementos críticos.

Ya que la bomba es un elemento cuyo funcionamiento y partes son internas, es imposible a simple vista determinar el estado real de las piezas. Afortunadamente

las fallas en los elementos rodantes de desgaste de la bomba no se producen instantáneamente, hay una serie de indicadores que revelan su estado, estos indicadores son, a saber, vibraciones mecánicas, aumento del caudal de pérdidas y baja presión de descarga.

El desarrollo de este proyecto pretende hacer una metodología de mantenimiento para diagnosticar fallas en bombas de pistones axiales asociadas con desgaste de los platos rodantes de presión a partir de un estudio espectral de las variables de presión, vibraciones y caudal.

2. JUSTIFICACIÓN

En Europa¹ el sector del mantenimiento y la gestión de activos dan trabajo a más de medio millón de personas, representan más de 19 billones de euros en la industria de gestión de activos y son un jugador importante en la dinamización de la economía. Por el contrario, en Colombia el mantenimiento se ve aún como un gasto. En las grandes empresas colombianas² por ejemplo el mantenimiento predictivo o bajo condición solo representan el 20% de los tipos de mantenimiento.

Un método de mantenimiento que toma fuerza cada vez más es el CBM (Condition-Based Maintenance), por la eficiencia que ofrece en todos los aspectos y su gran reducción del costo de mantenimiento, pues permite hacer un mantenimiento de acuerdo a lo que realmente se necesita y en el momento exacto.

Las fallas más comunes en las bombas hidráulicas son las relacionadas con la reducción en la eficiencia volumétrica, esto se debe mayormente al desgaste en los platos rodantes de presión, por lo tanto, este proyecto estará enfocado en ese aspecto, simulando 5 fallas en dichos platos con diferentes estados de desgaste, con el sistema en estado de carga. Para poner en marcha este método de mantenimiento se va implementar una metodología de análisis de falla mediante vibraciones mecánicas en el banco de pruebas para diagnóstico de fallas en bombas hidráulicas de pistones axiales perteneciente al grupo de investigación DICBOT.

¹ MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS: futuro de las empresas, Noticia Portafolio.co [En Línea][Fecha de consulta: 07/10/2015] . Disponible en: <http://www.portafolio.co/opinion/entrevista-presidente-congreso-mantenimiento-gestion-activos>

² ESTADO DEL ARTE MANTENIMIENTO EN COLOMBIA. ACIEM. 2009

3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

3.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander de formar profesionales e investigadores, de alta calidad ética, política y profesional, con capacidad de investigación e innovación, que contribuyan con el desarrollo de la industria, por medio de éste proyecto, el cual pretende fortalecer el grupo de investigación DICBOT (Dinámica control y robótica) perteneciente a la escuela de Ingeniería Mecánica y adscrito a Colciencias, con la continuación del desarrollo del banco de pruebas para detección de fallas en equipo hidráulico enfatizando en la bomba hidráulica de pistones axiales, suministrando una herramienta de estudio para las asignaturas de Sistemas Dinámicos, Ingeniería de Mantenimiento y Potencia Fluida.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica referente a sistemas de diagnóstico aplicado al análisis de fallas en sistemas de transmisión hidráulica, bomba variable-motor fijo.
- Diseñar e instrumentar el banco para registrar y analizar el torque en línea generado por el motor hidráulico usando una celda de carga de una tonelada.

- Diseñar un sistema de adquisición de datos en LabVIEW para registrar las señales de: Presión de salida de la bomba, flujo de pérdidas, y vibraciones de la bomba principal.
- Diseñar e implementar una metodología de sistema de diagnóstico de fallas en bombas hidráulicas de pistones axiales bajo carga de 5 fallas de desgastes en los platos rodantes de presión, fallas asociadas con la reducción de la eficiencia volumétrica: rango de fallas a estudiar [95 - 90% bomba nueva, 90-85% desgaste moderado, 85-80 % desgaste medio, 80-75% desgaste considerable, 75-65 % desgaste alto, menos de 65% desgaste severo] usando análisis de vibraciones mecánicas.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 REFERENTES TEÓRICOS

Un sistema hidráulico es un conjunto de componentes separados que se conectan entre sí, transportando un fluido al cual se le controla el caudal y la presión, usando como fundamento de funcionamiento el principio de Pascal. Este fluido posee cierta energía la cual es fácil de transportar y dirigir, es por este motivo que estos sistemas son tan usados. La versatilidad y la posibilidad de transmitir grandes fuerzas empleando pequeños elementos caracterizan los sistemas hidráulicos, además de ser fácil en el control de maniobras. A continuación, se explican los componentes principales de los sistemas hidráulicos.

4.1.1 Bombas Hidráulicas. La característica más importante de la hidráulica es la densidad de potencia. Es por este motivo que se usa en muchas aplicaciones como aeronáutica, naval y en maquinaria pesada donde el espacio y el peso juegan un papel importante.

La bomba es el componente más importante y menos entendido de un sistema hidráulico. Su función es convertir la energía mecánica en energía hidráulica al empujar el fluido hidráulico dentro del sistema.

Este proyecto está enfocado especialmente a bombas de pistones axiales, por tal motivo se profundizará más en este tipo de bombas. La primera patente de una bomba de pistones axiales en Estados Unidos se registró en 1893³, sin embargo no

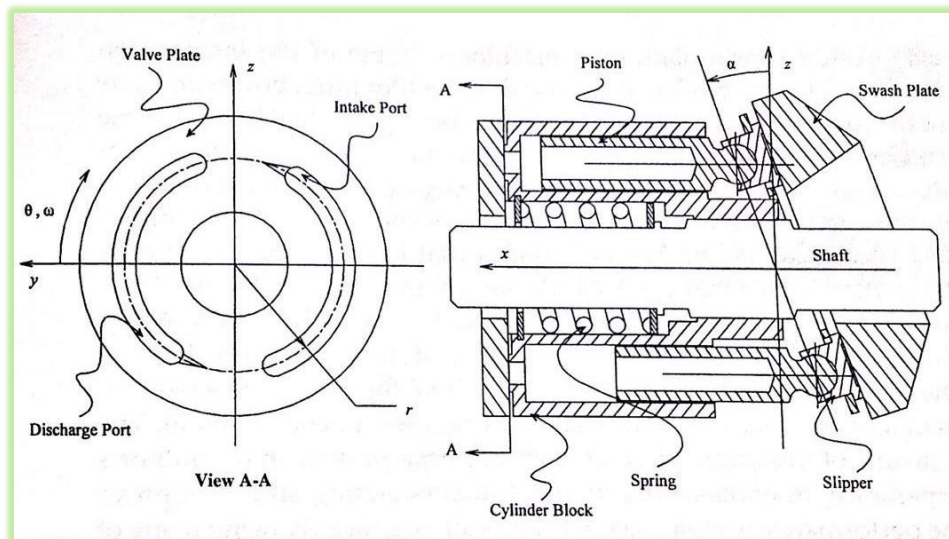
³ MANRING, Noah D. Fluid Power Pumps&Motors Analysis, design and control. MC Graw Hill. 2013. Pág.4.

fue hasta comienzos del siglo XX cuando se mejoró la industria eléctrica que pudo florecer el uso de sistemas hidráulicos de potencia.

Las bombas de pistones axiales están formadas por pequeños pistones que van subiendo y bajando de forma alternativa de un modo parecido a los pistones de un motor a partir de un movimiento rotativo del eje.

El conjunto de los cilindros y el eje de accionamiento tienen la misma línea central y los pistones se mueven alternativamente en sentido paralelo al eje.

Figura 1. Configuración de bomba de pistones axiales.



Fuente: Fluid Power Pumps&Motors. Noah D. Manring

Cuando el eje del motor que impulsa la bomba (eléctrico o de combustión interna) gira, los pistones realizan una carrera fijada por la placa de desplazamiento (placa inclinada). El fluido llega a la bomba por el lado de baja presión (entrada) y es transportado por los pistones hacia el lado de alta presión (salida).

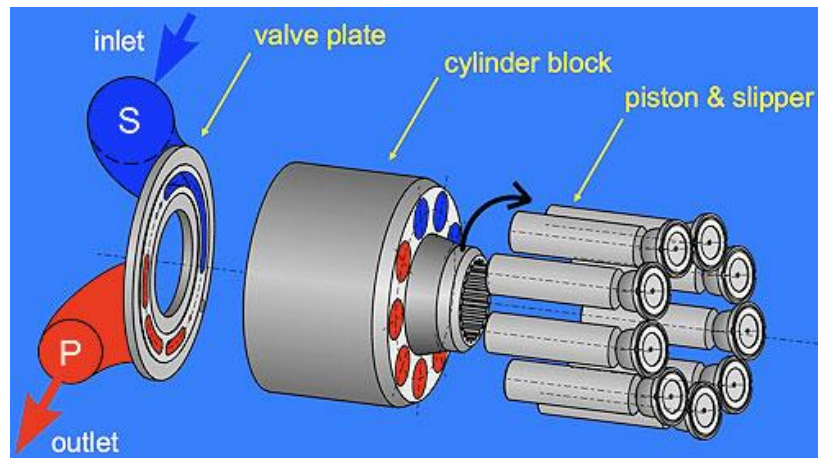
Este tipo de bombas son ampliamente utilizadas en la industria debido a su alta eficiencia además de su amplio rango de presión de trabajo. Asimismo, son variables y reversibles, sirven para aplicaciones en prensas grandes e impulsos hidrostáticos.

En esta bomba en particular los nueve pistones son contenidos en una camisa. La camisa esta insertada en el eje conductor. Los pistones presentan un movimiento recíprocante en cada uno de sus respectivos alojamientos dentro de la camisa, efectuando la acción de bombeo por el movimiento del plato inclinado de desplazamiento fijo.

El plato de desplazamiento fijo no es más que un anillo de acero con un ángulo de 15° con respecto a la vertical de la carcasa en la bomba, la película de lubricación hidrodinámica entre la superficie del pistón y el plato de lubricación es creada por un patín cojinete de bronce, el cual tiene una cavidad esférica que conecta el pistón contra el plato de lubricación por un anillo de retención.

Los puertos de aceite y de la camisa de los pistones están conectados a una válvula de distribución, esta válvula es un anillo de bronce con dos semicírculos en forma de riñón, que están conectados por unos pasajes en la carcasa de la bomba a los puertos de succión y de descarga en la bomba. Dependiendo de la rotación de la bomba el ángulo de la placa de lubricación determina los puertos de descarga y de succión.

Figura 2. Elementos rotantes de una bomba de pistones axiales



Fuente: John Jones, Hydraulic Pump Div., Parker Hannifin Corp.

A medida que la camisa rota, lleva cada uno de los pistones, exactamente durante media revolución los pistones son empujados de sus respectivas cavidades debido a que el anillo de retención gira en forma inclinada.

Cuando han alcanzado la máxima posición de extensión, los pistones comienzan a subir entregando el fluido por el puerto de descarga. El desplazamiento de la bomba es determinado por el número de pistones, por el diámetro de los pistones y por la longitud de la carrera. El ángulo del plato de lubricación determina la longitud de la carrera de los pistones.

4.1.2 Análisis de Vibraciones Mecánicas. La vibración se define como el movimiento repetitivo de objetos respecto a una posición de referencia, usualmente⁴ llamado punto de equilibrio. Las vibraciones generalmente no son buenas para una máquina, pues pueden provocar fisuras por fatiga, desgaste, roturas, ruidos, en fin; pero al mismo tiempo las vibraciones se pueden usar para conocer la condición mecánica de una máquina y se puede relacionar con la evolución de un defecto de la misma.

Las vibraciones se pueden definir como⁵ “el movimiento de una masa desde un punto de reposo a lo largo de todas las posiciones y de regreso al punto de reposo, donde está lista la máquina para repetir el ciclo”.

Entre los parámetros de vibración que más se analizan se encuentra: La severidad de la vibración, los espectros en cuales se encuentra la vibración, situaciones de movimiento, velocidades pico, banda octava, desviaciones en las frecuencias de vibraciones, aceleración pico, espectros de frecuencias, ángulos de fase, bandas amplias y estrechas, etc. Su utilidad es muy alta en el monitoreo y diagnóstico de equipos rotativos.

- **Dominio del tiempo**

En vibraciones mecánicas, el dominio del tiempo es útil para identificar eventos únicos de una máquina y en el régimen en el cual se repiten. Con esta configuración se puede ver el comportamiento físico de la máquina o la falla en el caso particular de la señal vibratoria.

- **Dominio de la frecuencia**

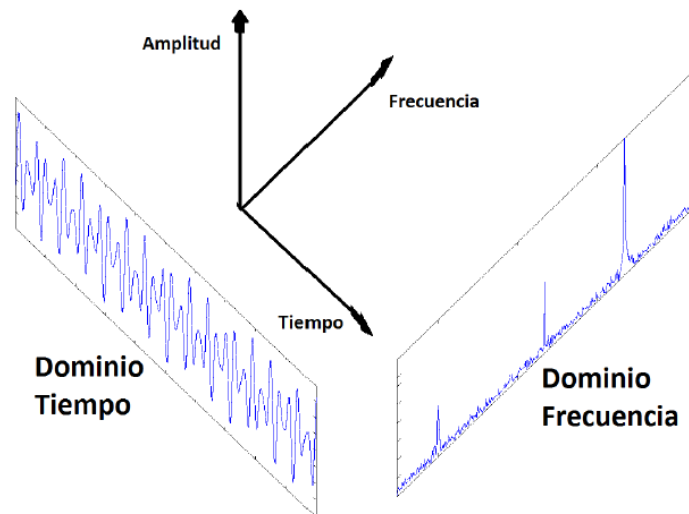
⁴ GARCÍA CASTRO, Alfonso. Análisis de vibraciones. UIS. Bucaramanga. 1992

⁵ MORA GUTIÉRREZ, Luis Alberto. Mantenimiento: Planeación ejecución y control. México. Alfaomega grupo editor. 2009. Pág. 408 ProQuest.

Se conoce también como espectro y corresponde a la imagen de las magnitudes de vibración relacionadas con la frecuencia y se encuentra por medio de un análisis FFT (Fast Fourier Transform).

El dominio de la frecuencia sirve para identificar todas las excitaciones presentes en la máquina.

Figura 3. Dominio del tiempo y frecuencia



Fuente: ARDILA Miguel, Proyecto de grado. 2014

El análisis de vibraciones se puede hacer mediante el análisis del tiempo o el análisis de la frecuencia, no obstante, se hace ineludible definir las magnitudes físicas empleadas para el análisis, definidas en la norma ISO 2041.

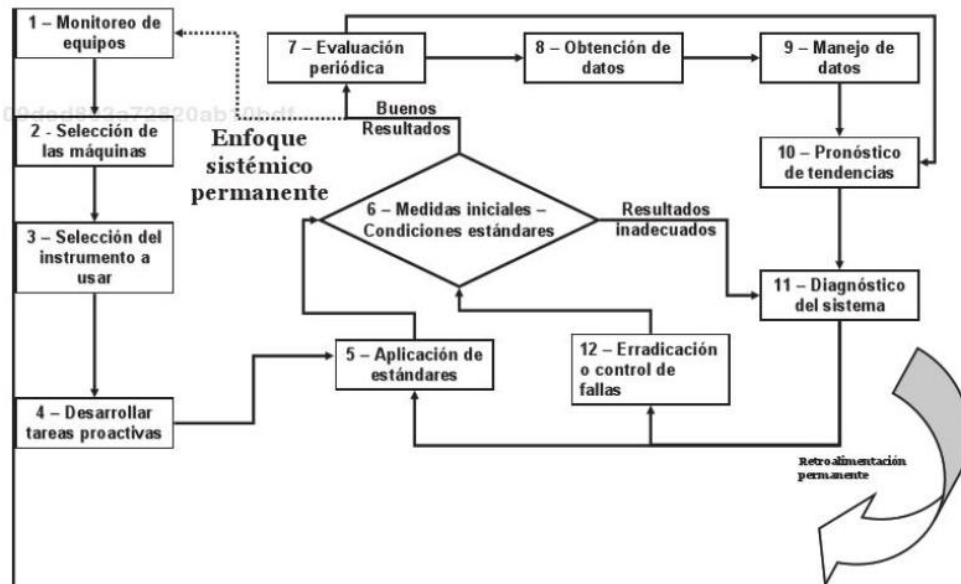
Según Mora⁶ la puesta en marcha de un sistema de monitoreo de vibraciones se puede realizar en tres fases:

⁶ Íbid.,pág. 409

- Medición de los niveles de vibración, cuyo propósito es determinar varios valores iniciales, (Análisis de signatura, definición de los puntos por muestrear y registro de resultados previos).
- Análisis del comportamiento de la frecuencia mediante filtración de banda para erradicar incidentes no deseados o parásitos.
- Vigilancia permanente con la aplicación del sistema de análisis integral y monitoreo en tiempo real.

En la siguiente figura se observa con un gráfico de bloques los pasos a seguir para establecer un sistema de monitoreo.

Figura 4. Sistema de monitoreo



Fuente: Mora Luis. Mantenimiento: Planeación ejecución y control.

4.1.3 Mantenimiento Predictivo. El mantenimiento se resume a disponibilidad de los activos de una empresa el mayor tiempo posible. Y aquellos activos que resultan más costosos para la empresa, es decir, que no se puede tener un repuesto inmediato en caso de que ocurra la falla funcional dado a sus altos costos, demandan más atención del departamento de mantenimiento, esto conlleva a un trato especial y un poco más costoso, pero incrementa en gran medida la disponibilidad de estos equipos y evita paradas innecesarias para revisiones sistemáticas.

Esta medida es el mantenimiento predictivo. Como ya se dijo, resulta costoso pero tienen una gran rentabilidad⁷ a mediano y a largo plazo y sus ventajas son evidentes:

- Conocer el estado de la máquina en todo instante.
- Eliminar prácticamente todas las averías.
- Solo se para o interviene el equipo cuando realmente es necesario.
- Conocer el daño en los componentes desde una fase inicial del mismo, permitiendo programar su sustitución en el momento más conveniente.
- Al intervenir en la máquina se conoce el problema, reduciendo el tiempo de la reparación.
- Lograr identificar los fallos ocultos, así como la causa de fallos crónicos.
- Reducir las piezas del almacén, adquiriéndolas cuando se detecta el problema en una fase primaria.
- Conseguir bonificaciones en primas de seguros.

⁷ SINAIS, Ingeniería de mantenimiento. Curso de Vibraciones. [En línea][Fecha de consulta: 07/05/15]. Disponible en: <http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/intro/predictivo.html>

- Incrementar la seguridad de la planta.

Este tipo de mantenimiento es, en pocas palabras, el mantenimiento⁸ planificado y programado con base en el estado o condición, también es llamado mantenimiento bajo condición. Consiste en el monitoreo constante de variables como temperatura, presión, vibraciones, caudal, ultrasonidos, humedad, aceleración etc. Con esta supervisión continua de las máquinas se logra detectar las señales o síntomas característicos que genera una falla incipiente.

Según Cuatrecasas⁹, la filosofía del mantenimiento predictivo es que normalmente las averías no aparecen de repente, tienen una evolución. La gestión del mantenimiento predictivo tiene varias etapas, en función del tiempo se puede ir evaluando el estado real de la máquina, sin embargo, llega un punto en el que se debe ir pensando en intervenir pronto la máquina. A esto, Mora¹⁰ lo llama límite de control, y se puede ver en la figura 5.

CBM son las siglas para Mantenimiento basado en condición, en su traducción al español. El concepto de CBM¹¹ fue introducido por primera vez por el Río Grande Railway Company en finales de 1940 y en un principio se le llamó "el mantenimiento predictivo". La norma ISO 13372:2012, es la que define este tipo de análisis.

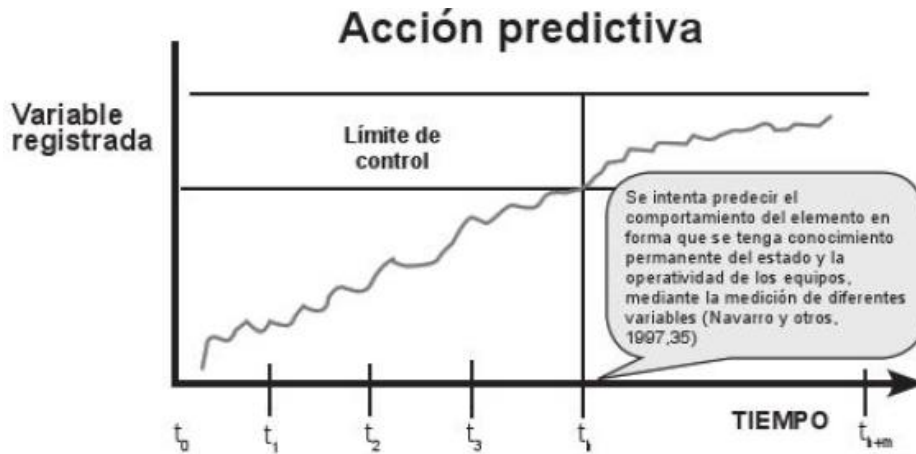
⁸ BORRÁS PINILLA, Carlos. [2013]. Ingeniería de Mantenimiento Material docente. UIS. Bucaramanga: Autor.

⁹ CUATRECASAS, Arbós, Lluís. Gestión del mantenimiento de los equipos productivos. España: Ediciones Díaz de Santos, 2012. ProQuest ebrary. Web. 22 October 2015.

¹⁰ Mora Gutiérrez, Luis Alberto. Mantenimiento: planeación, ejecución y control. México: Alfaomega Grupo Editor, 2009. ProQuest ebrary. Web. 22 October 2015.

¹¹ History of CBM. [En Línea] Disponible en: www.omdec.com/moxie/Technical/Reliability/a-history-of-cbm.shtml

Figura 5. Situaciones de las acciones predictivas.



Fuente: Mantenimiento: planeación, ejecución y control. Mora Gutiérrez

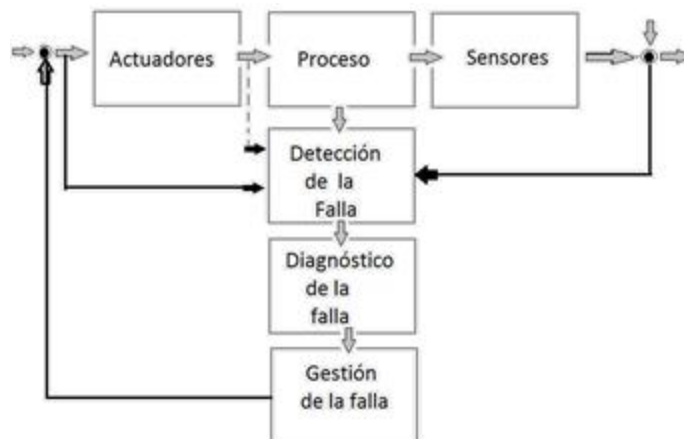
No obstante, el mantenimiento predictivo tiene como desventaja el factor económico, siempre decisivo, además de la falta de mano de obra calificada para este trabajo.

Las técnicas para detectar el surgimiento de las fallas y los defectos en la maquinaria varían desde la utilización de los sentidos humanos hasta las técnicas de moda como: el análisis de vibración, la termografía, la tribología, el análisis de circuitos de motores y el ultrasonido. Este proyecto se centra en el análisis de vibraciones mecánicas como técnica de mantenimiento predictivo, utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT) para realizar un análisis en el dominio de la frecuencia.

4.1.4 Métodos de Detección de Fallas. Para un análisis integral y desarrollo del mantenimiento, hay que definir unas etapas que componen este proceso. En la figura 6 podemos ver las tres etapas principales de un proceso de mantenimiento predictivo.

Para la detección de fallas existen múltiples métodos, los cuales se pueden clasificar en dos grandes familias; la detección con señales individuales y la detección con múltiples señales y modelos.

Figura 6. Etapas del proceso de mantenimiento.



Fuente: R. Isermann. Fault diagnosis systems.

El diagnóstico de las fallas, así como la gestión de las mismas son pasos que suceden a la detección de las fallas.

Una falla se define como la desviación de una característica o parámetro denominada función de una condición normal. A partir de esta definición de falla se puede inferir matemáticamente que se trata de una desviación de un valor. Por lo tanto, no sería complicado pensar en algunos métodos de comparación que encuentren errores o fallas.

A continuación, se presentan las técnicas de detección usadas en este proyecto, sin embargo, se recomienda ver el anexo 12 donde se encuentra un resumen completo de las técnicas de detección y diagnóstico comúnmente usadas en sistemas hidráulicos.

4.1.4.1 Transformada Rápida de Fourier (FFT). La FFT es una técnica de análisis de dominio de frecuencia. El término se aplica a una clase de algoritmos que se utilizan para convertir una serie continua de algún parámetro como que varía con el tiempo en sus componentes de frecuencia.

Para algunos fenómenos, el análisis en el tiempo no determina nada, sin embargo, al analizar el espectro de una frecuencia se pueden encontrar detalles que marcan o caracterizan fallas.

La FFT es una técnica antigua que es muy usada en el medio de la detección de fallas, sin embargo, últimamente se intenta profundizar en otras técnicas que la complementen.

Por ejemplo Singh¹² usa el análisis de la FFT para la detección de fallas en motores. En este trabajo ellos utilizaron una combinación de tres algoritmos de distorsión de tiempo: Dinámico (DTW) y los coeficientes de Mel Cepstrum frecuencia (MFC) y la transformación rápida de Fourier (FFT) para la clasificación de diferentes fallos del motor. El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un nuevo sistema inteligente que debe ser capaz de predecir el posible fallo en un motor funcionando a diferentes talleres. Ellos analizaron los métodos para 5 fallas características de un motor. Se

¹² SINGH, Vriajendr and NARENDRA Meena. Engine Fault Diagnosis using DTW, MFCC and FFT. Indian Institute of Information Technology Allahabad, India. 2009.

concluyó que la FFT solo podía reconocer una de los cinco tipos de fallas analizados, y que el análisis del Cepstrum puede clasificar 3 fallas. Al combinar los métodos, el sistema de clasificación mejora.

La mayoría de los sistemas que realizan detección de fallas usando FFT combinan con otras técnicas, es el caso de De Santana¹³ y sus colaboradores. Ellos implementaron un sistema de detección de fallas para un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), usando FFT y redes neuronales. La falla estudiada es el cortocircuito. El sistema utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT) para preprocesador de datos, que consisten por las corrientes de línea estator. Se emplea el Análisis de Componentes Principales (PCA) para reducir la dimensionalidad de los datos de salida de FFT y la identificación de fallos se realiza por medio de la red neural artificial (ANN). Además, un post-procesamiento (PP) se emplea con el fin de aumentar la fiabilidad de la red, lo que reduce el error de la ANN. El sistema se simula en el MATLAB software de simulación utilizando una base de datos con diferente voltaje, velocidad y cargar. Los resultados muestran que el sistema con PCA, FFT y ANN tiene un buen rendimiento y precisión con el PP para la identificación de fallos en el DFIG.

Para complementar el análisis de FFT se recomiendan métodos menos usados como la estimación espectral máxima entropía, usados por ejemplo en identificación de fallas para la culata de un motor¹⁴.

¹³ DE SANTANA, Marcelo Patricio, BOFFINO DE ALMEIDA Jose Roberto Monteiro, TEIXEIRA DE PAULA Geyverson, Thales Eugenio PORTES DE ALMEIDA, Gustavo BUENO ROMERO, and Julio Cesar FARACCO. Fault Identification in Doubly Fed Induction Generator Using FFT and Neural Networks. University of Sao Paulo, School of Engineering of Sao Carlos, Sao Carlos, Brazil. 2012.

¹⁴ R. Tafreshi, F. Sassani, H. Ahmadi, and G. Dumont. Entropy Measure and Energy Map in Machine Fault Diagnosis

4.1.4.2 Análisis Espectral. El espectro es la disposición espacial de los componentes de la energía radiante en el orden de su longitud de onda, número de onda o frecuencia. El análisis del espectro (spectrum analysis) corresponde a estudiar el espectro de una señal de entrada, mayormente se estudia la energía contenida en esos datos cuando es posible.

Rgeai¹⁵ utiliza el análisis de espectro para detectar fallas en una caja de engranajes helicoidales de dos etapas accionado por un motor eléctrico de 11 kW. La señal que ellos utilizan es la de la corriente del motor, queriendo analizar desde ese punto los fallos que se presentan en la caja de engranajes, las variaciones en la corriente debido a fallas en los engranajes. Ellos observaron que el espectro de la corriente del motor contiene muchos componentes de frecuencia, donde domina la frecuencia de 50 Hz. En este estudio también se midieron vibraciones que corroboraran los resultados, pues este estudio para engranajes es más conocido. Se pudieron encontrar cambios en la señal de corriente cuando hay fallas, tanto a altas como a bajas frecuencias, sin embargo, se recomienda usar otros métodos para identificar plenamente fallas en la señal de corriente.

4.1.4.3 Densidad Espectral de Potencia (PSD por sus siglas en inglés). Se trata de una función matemática que muestra el nivel de energía contenida en la señal sobre las distintas frecuencias de las que está formado el espectro. En otras palabras, muestra cuales frecuencias son “fuertes” y cuales son “débiles”.

¹⁵ RGEAI Mohamed, Fengshou Gu, Andrew Ball, Mohamed Elhaj and Mohamed Ghretli . Gearbox Fault Detection Using Spectrum Analysis Of The Drive Motor Current Signal. The Higher Institute of Electronic Profession, Al-Jrab Street, Tripoli, Libya. 2009.

Sus unidades se pueden dar en energía o potencia contra frecuencia. MatLab trae en sus librerías la función para obtener fácilmente el espectro de potencias.

Usualmente el análisis de PSD se usa en compañía de la FFT para hacer análisis de señales no estacionarias, y complementarse mutuamente pues la FFT muchas veces no es capaz de determinar nivel de importancia de una frecuencia en específico. Por ejemplo el trabajo de Cusido¹⁶ en el cual hace una detección de fallas para motores de inducción usando análisis de PSD en descomposición Wavelet, para el cual extrae los componentes de frecuencia que indican falla utilizando la PSD y luego clasificándolos con Wavelet.

También Antoni¹⁷ usa el análisis PSD para detectar fallas en engranajes y rodamientos en cajas de cambios de helicópteros, usando señales de vibración que son descompuestas con PSD para encontrar las fallas.

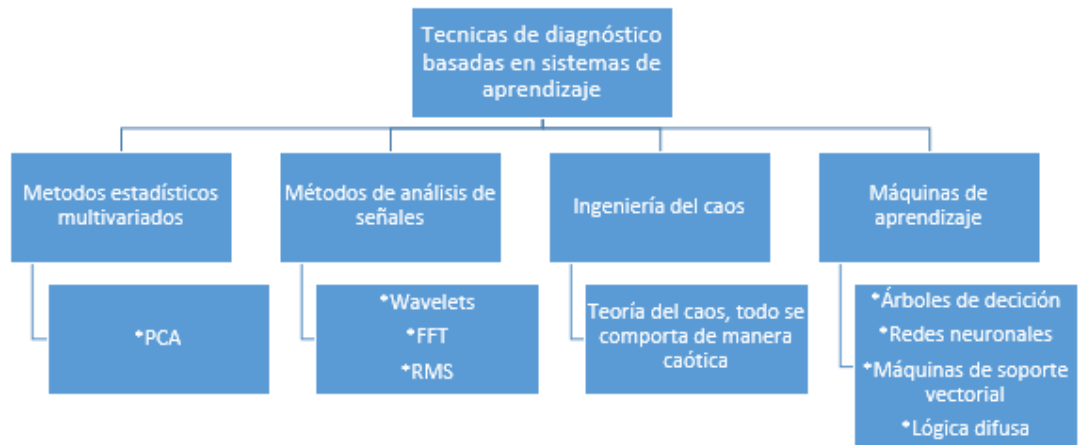
4.1.5 Métodos de Diagnóstico de Fallas. Actualmente se realizan muchos estudios acerca de los métodos de detección y diagnóstico de fallas, esto impulsado por la necesidad de optimizar recursos, evitando fallas en equipos. Brevemente enunciaremos algunos de los métodos más utilizados para diagnosticar sistemas hidráulicos.

Dentro de los métodos de diagnóstico de fallas estos se pueden dividir en cuatro grandes grupos, los métodos de clasificación basados en reglas, sistemas de razonamiento basados en casos, los modelos basados en razonamiento y los

¹⁶ CUSIDO, Jordi. Fault Detection in Induction Machines Using Power Spectral Density in Wavelet Decomposition. Tech. Univ. of Catalonia, Barcelona. 2008.

¹⁷ ANTONI, J. Differential Diagnosis of Gear and Bearing Faults. School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales, Sydney 2052, Australia. 2002.

sistemas de aprendizaje. Dentro de los sistemas de aprendizaje existe otra sub clasificación que se muestra en la siguiente gráfica.



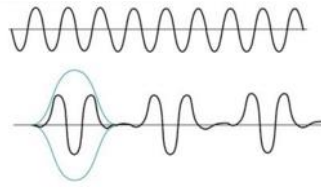
A continuación, se observa una tabla donde se nombran las principales técnicas de detección y diagnóstico de fallas más comúnmente usadas para en los sistemas hidráulicos. Se recomienda ver el anexo 12, donde se describen cada una de esas técnicas y se muestra un ejemplo de aplicación.

Tabla 1. Metodos de detección y diagnóstico de fallas usadas comúnmente para sistemas hidráulicos.

Métodos de detección de fallas	Métodos de diagnóstico de fallas
Límite de comprobación	Wavelet
Comprobación de tendencia	Fuzzy Logic
Análisis de contaminación de fluidos	Arboles de decisión
Termografía	Análisis de componentes principales (PCA)
Tribología	Transformada rápida de Fourier (FFT)
Ultrasonido	RMS
Análisis de componentes principales (PCA)	Ingeniería del caos
Transformada rápida de Fourier (FFT)	Redes Neuronales
Cepstrum	Máquinas de soporte vectorial
Backstrum	Clasificadores basados en ejemplos
Wavelet	Redes Bayesianas
Análisis de correlación (AFC)	Curtosis
Spectrum Análisis	Algoritmos de agrupamiento (clustering)
Fuzzy Logic	KPCA Análisis de componentes principales con función Kernel
Power Spectral density (PSD)	

4.1.6 Ventana Hanning Las ventanas son funciones matemáticas usadas con frecuencia en el análisis y el procesamiento de señales para evitar las discontinuidades al principio y al final de los bloques analizados. El propósito de la ventana es remover (o suavizar) las discontinuidades que existen al principio y fin de nuestra muestra. Si no se remueven, estas discontinuidades se pueden manifestar como frecuencias más altas que la frecuencia de Nyquist cuando ocurre el muestreo. Su representación matemática es:

$$v_{(n)} = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2 \pi n}{N - 1}\right), \text{ donde } a_0 = 0.5; a_1 = 0.5$$



La ventana Hanning, tiene la forma de un ciclo de una onda cosenoidal, a que se agrega 1 para que así siempre sea positivo. La ventana Hanning realiza un buen trabajo, forzando las extremidades hacia cero, pero también agrega distorsión a la forma de onda que se está analizando, bajo la forma de modulación de amplitud, eso es la variación en amplitud de la señal sobre la grabación de tiempo.

Flórez¹⁸ afirma que la ventana Hanning es más efectiva para análisis en el que se involucra la FFT, así mismo White¹⁹ dice que para el análisis de vibraciones es la ventana que se comporta de mejor manera para el tratamiento de las señales, en general, la mayoría de estudios y autores recomiendan el uso de la ventana Hanning.

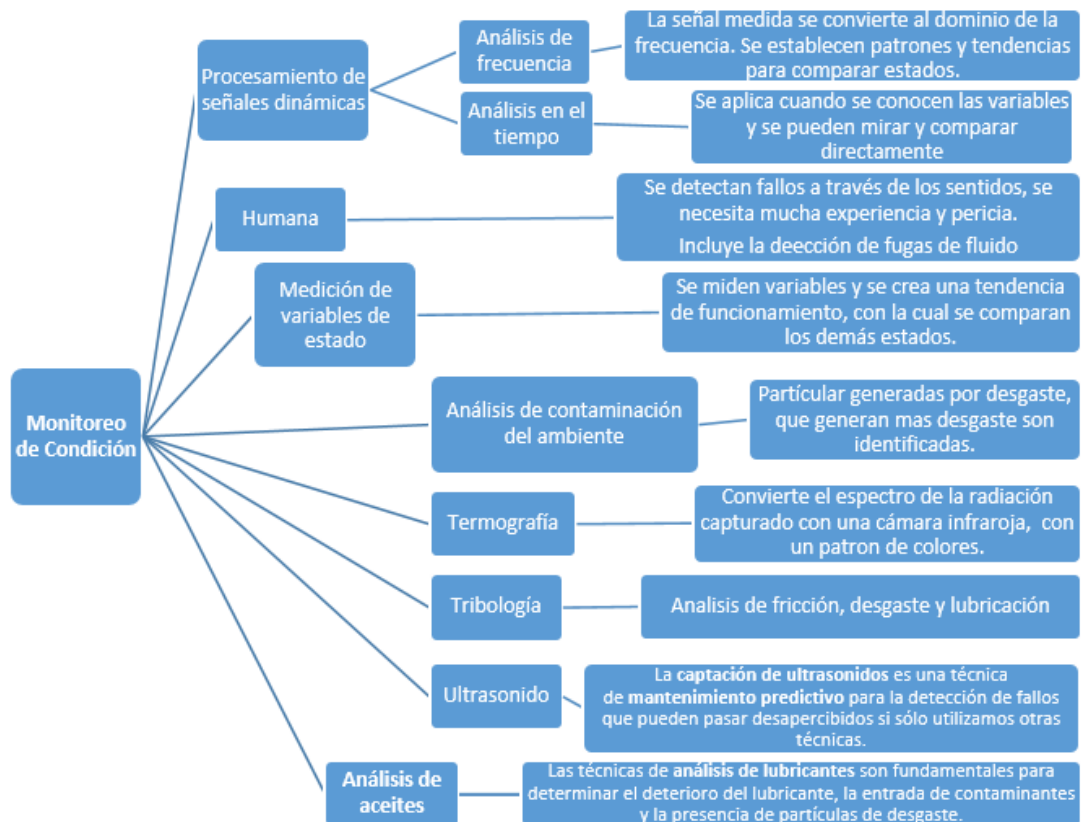
¹⁸ FLÓREZ Elkin, Selección de la ventana temporal en la transformada de Fourier en tiempos cortos utilizada en el análisis de señales de vibración para determinar planos en las ruedas de un tren. Programa de Ingeniería Mecánica. U.P. Colombia 2009.

¹⁹ WHITE, Glen. Introducción al análisis de vibraciones. Azima DLI. 2010. Pág 65.

5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El primer objetivo en este proyecto de grado es realizar una revisión bibliográfica referente a sistemas de diagnóstico aplicado al análisis de fallas en sistemas de transmisión hidráulica, bomba variable-motor fijo.

Para el monitoreo de condición de máquinas hidráulicas y en general de cualquier máquina existen varias técnicas, que a continuación se resumen en el siguiente gráfico.



Se puede ver la variedad de técnicas para el monitoreo de condiciones, a continuación, se resumen algunos trabajos de investigación que usaron estas y otras técnicas más.

Helwig²⁰ hizo un estudio en sistemas hidráulicos para identificación de fallas basada en métodos estadísticos usando características del espectro de vibración, donde aprovecha el uso de la transformada rápida de Fourier, usó un banco de pruebas donde se simulaban fallas de desgaste en una válvula de conmutación. Se concluye que las fallas son cuantificables e identificables según el estudio, y aún más se concluye que es posible identificar otros tipos de fallas, por ejemplo, las fugas internas de la bomba por desgaste.

Zeliang Li²¹ en su tesis de maestría monitorea las condiciones de una bomba de pistones axiales y se concentra principalmente en la falla correspondiente a desgaste de los pistones y las fugas que se presentan entre ellos. Entre los principales hallazgos se encuentra el hecho de comprobar que la simulación de este tipo de falla es que tiene una excelente correlación con una bomba que tenga este tipo de fallas reales, además que las fallas de los pistones afectan el flujo de salida de la bomba, así como las ondas de presión a la salida y estas dependían directamente del nivel de desgaste de los pistones.

Behnam Razavi²² en su propuesta de grado de maestría estudia el comportamiento de los sistemas hidráulicos, especialmente en una máquina, cuya mesa de trabajo la cual se usa para cortar pescado a escala industrial, se mueve por medio de actuadores hidráulicos, Razavi estudia todo el sistema hidráulico usando un método para filtrar los datos llamado filtro Kalman (UFK), el cual es un algoritmo que sirve para separar datos a analizar. Se basa en estados y el estado futuro depende

²⁰ Nikolai Helwig, Steffen Kleinb and Andreas Schützea,b. Identification and quantification of hydraulic system faults based on multivariate statistics using spectral vibration features.

²¹ Zeliang Li. Condition Monitoring of Axial Piston Pump. Master's Thesis. 2005. Saskatoon, Canadá.

²² Behnam Razavi. Condition Monitoring in a Hydraulic System of an Industrial Machine using Unscented Kalman Filter. Master's Thesis. University of Saskatchewan, 2007.

del estado actual. Se analizaron cuatro fallas en los actuadores y se concluyó que estas fallas podrían ser diagnosticadas.

Zhang²³, en su artículo presenta un método basado en redes neuronales para el diagnóstico de fallas por fugas de los sistemas hidráulicos. El procedimiento de este método es un análisis del transitorio de la presión. Después de añadir ruido en los patrones de aprendizaje de las redes neuronales, la capacidad de eliminar el ruido se incrementa. Por último, se concluye que este método para el diagnóstico de fallas de fuga es más confiable y de menor costo que los métodos usuales.

También basado en redes neuronales artificiales, Ahemd El-Betar²⁴ realiza una investigación en el diagnóstico de fallas de sistemas hidráulicos, pero esta investigación se centra en dos fallas: fugas internas en el actuador y bloqueo en el spool de la válvula direccional. En su investigación hace un entrenamiento de la red neuronal con muchos datos y concluye que la red neuronal es capaz de identificar los fallos en el sistema y además clasificarlos según su severidad. También afirma que la red es capaz de identificar fallas en el sistema, que no fueron entrenados por la red con alta precisión. Sugiere que su investigación puede ser implementada en aplicaciones de la industria.

Hast²⁵ hace un estudio para detectar y aislar fallas paramétricas en bombas hidráulicas y lo hacen basándose en una técnica de especificaciones de falla

²³ Zhang, Z., Fu, Z., and Chen, Z. Leakage Fault Diagnosis of the Hydraulic System Based on the BP Neural Network. *Mechanical Science and Technology*, 17, pp. 116-118.

²⁴ Ahemd El-Betar, MagdyM. Abdelhamed*, Ahmed El-Assal and Roubi Abdelsatar. *Fault Diagnosis of a Hydraulic Power System Using an Artificial Neural Network*. Ain Shams University, Cairo, Egypt. 2006.

²⁵ Daniel Hast a,b, RolfFindeisen b,n, StefanStreif. Detection and isolation of parametric faults in hydraulic pumps using a set-based approach and quantitative–qualitative fault specifications.

cuantitativa y cualitativa. Se enfocan en todos los fallos relacionados con la pérdida de la eficiencia en la bomba, desgaste en todos los elementos que tienen fricción, e intentan modelar con éxito estas fallas, modelo que después validan. Analizan variables como la presión, la velocidad, el torque, la temperatura y el flujo. La ventaja del método, según los autores, con respecto a las otras técnicas de detección de fallas es que se puede hacer on-line. Finalmente, los autores sugieren que el método se puede fortalecer poniendo más datos y variables, teniendo en cuenta que puede disminuir la incertidumbre.

El trabajo de Zachrison²⁶, consistió en intentar detectar fallas en sistemas hidráulicos de potencia, aunque también lo hace para sistemas neumáticos, usando mapas de organización automática, los cuales pueden identificar cambios en el sistema y por lo tanto detectar fallas. Se enfoca este trabajo en dos fallas en las válvulas. Los mapas hacen clasificaciones con rangos que permiten ver en qué rango está el sistema, ver cuando no está en rangos permitidos y confirmar la falla del equipo.

Hu²⁷, trabajó el diagnóstico de fallas en bombas hidráulicas basado en la fusión de datos de la teoría de la evidencia D-S. El algoritmo selecciona las señales características y parámetros, utilizando funciones básicas de asignación, para identificar los marcos de referencia que tendrán la capacidad de identificar los fallos.

Technische Universität Ilmenau, Automation Engineering, Helmholtzplatz 5,98684 Ilmenau,Germany. 2014.

²⁶ Zachrison, Anderson. Fluid Power Applications Using Self-Organising Maps in Condition Monitoring. Linköping University. Suecia. 2008

²⁷ HU, Xiaoming. The Fault Diagnosis of Hydraulic Pump Based on the Data Fusion of D-S Evidence Theory. Huaiyin Institute of Technology, Huaian, China.

Se resalta que como el algoritmo selecciona las señales sin depender de valoraciones subjetivas de algún experto, se logra un resultado más objetivo. Usa como parámetros las vibraciones mecánicas y la presión. Otra cosa que resaltan las conclusiones es que se reduce la incertidumbre en el diagnóstico de las fallas, gracias a la fusión de datos basados en la teoría de la evidencia.

El trabajo de Cheng Lu²⁸ consistió en hacer identificación de fallas a bombas hidráulicas de aviones, basado en una red paralela de una función de base radial (RBF). Este método analiza los errores residuales de un sistema entrenado y en las diferencias encuentra fallas. Este método permite almacenar varios estados como estados normales, que es una ventaja ya que los sistemas no siempre se comportan perfectamente iguales sin ser eso una falla. Este trabajo se validó comparando los resultados con un análisis similar usando redes neuronales. El autor señala que las máquinas de soporte vectorial (SVM) son mejores para éste tipo de análisis y que en el futuro su estudio se enfocara en este método de detección de fallas. Basado en el error residual, se logró identificar fallas en bombas, por lo tanto, se concluye que la metodología es útil para identificación de fallas.

Qing-hua He²⁹ quiso implementar un sistema de detección de fallas para el sistema hidráulico de una retroexcavadora por medio del análisis estadístico de componentes principales (PCA), en el que se pueden encontrar relaciones dinámicas entre las variables del proceso. Para éste método se entrena con datos de entrada medidos del sistema, después se hace un tratamiento de datos que consiste en descomponer los datos en sub espacios de componentes principales y

²⁸ Lu et al.: Fault detection for hydraulic pump based on chaotic parallel RBF network. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing 2011.

²⁹ HE Qing-hua, HE Xiang-yu and ZHU Jian-xin. Fault detection of excavator's hydraulic system based on dynamic principal component analysis. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. 2008.

al final se apoya en la estadística para encontrar unos índices de detección de falla. Se logra una detección de fallos con una precisión del 95% analizando 20 conjuntos de muestras comparándolas con simulaciones. Se concluye que este método es eficaz en la detección de fallos.

De la misma manera, J. Yin and L. Mei³⁰, trabajaron para detectar fallas en el sistema hidráulico y eléctrico de una retroexcavadora pero usando como método un sistema experto. La metodología de detección de fallas con sistema experto consiste en recopilar unas “reglas” que históricamente se han podido determinar por la experiencia de unos ingenieros dedicados en el tema de fallas de estos sistemas, y luego hacer una programación con estas reglas. Posteriormente se extraen datos del sistema los cuales se pasan por el programa con las reglas y si hay fallas, el sistema las detecta y entrega las posibles causas de la falla, así como la ubicación de la misma. En un sistema experto es posible detectar fallas con alta exactitud, pero no es posible detectar nuevas fallas, ni entrenar el sistema como en otros métodos si es posible.

Hay algunas veces que las fallas en los sistemas hidráulicos no se pueden identificar con los métodos regulares, es por esto que Sheng³¹ desarrolló un sistema de identificación de fallas en sistemas hidráulicos, usando múltiples clases de máquinas de soporte vectorial, un análisis de entrada complicado.

³⁰ J. Yin and L. Mei. Mechanical Engineer Department, Tongling University, China. 2001. Springer.

³¹ LI Sheng, ZHANG Peilin and WANG Guode. Hydraulic System Faults Diagnosis Based on Multi-class Support Vector Machine. 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation. Ordnance Engineering College Shijiazhuang, 050003, China

El objetivo era tratar de clasificar las fallas que normalmente no se pueden identificar en un sistema, usando menos datos de entrada, pero con un artificio matemático llevar esos datos a dos clases o capas, lo cual mejora el procesamiento e identificación. Se concluye que este algoritmo desarrollado es muy eficiente, ahorrando tiempo y funciona mejor que las redes neuronales. El autor propone comparar los dos métodos para comprobar la capacidad de su técnica.

6. REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL FRENO PARA EL BANCO DE PRUEBAS

6.1 JUSTIFICACIÓN Y REQUERIMIENTOS

En el diagnóstico de fallas muchas veces es necesario analizar el sistema completo. Es por eso que en el banco de pruebas de la Hidrotransmisión bomba-motor que se estudió, se crea la necesidad de conocer el torque de salida en el motor hidráulico para poder determinar eficiencias y hacer un análisis más completo en el diagnóstico de la Hidrotransmisión.

Dicho esto, el objetivo es diseñar e instrumentar el banco de pruebas con una celda de carga, con capacidad para una tonelada, de manera que se pueda determinar el torque en línea generado por el motor hidráulico. Se sobreentiende que el diseño escogido debe ser fácil de usar, seguro y de buena calidad.

Aunque es posible determinar el torque del motor gracias a las ecuaciones de hidráulica, se hace necesario conocer el torque real o más aproximado al real para efectos de análisis.

6.2 MARCO REFERENCIAL

Para un movimiento circular, como en el caso de un motor hidráulico, la potencia (P) se calcula con la multiplicación del torque (τ) por la velocidad angular (ω).

$$P = \tau * \omega$$

Está definido que el torque se refiere al momento de fuerza que ejerce el motor sobre un eje de transmisión de potencia. Y además el torque o momento de fuerza se calcula de multiplicar una fuerza por el radio.

$$\tau = F * r$$

Así definimos entonces que el torque es función de una fuerza aplicada, la cual será la fuerza que se medirá con la celda de carga, multiplicado por un radio que estará definido.

Ahora bien, hay muchas formas de medir el torque, sin embargo, nuestra limitante será el uso de la celda de carga. Dicha celda de carga suministrada por el grupo de investigación DicBot es una celda tipo S, marca LEXUS modelo SC-1t, con capacidad máxima hasta para una tonelada, que cuenta con un convertidor analógico UTILCELL versión 89061, mod. SGA/D, cuyas características se encuentran en el anexo 1.

Figura 7. Celda de Carga tipo S marca Lexus 1t



Fuente: <http://www.bci.co/productos/pesaje/celdas-carga/tipo-s/lexus-sc.html>

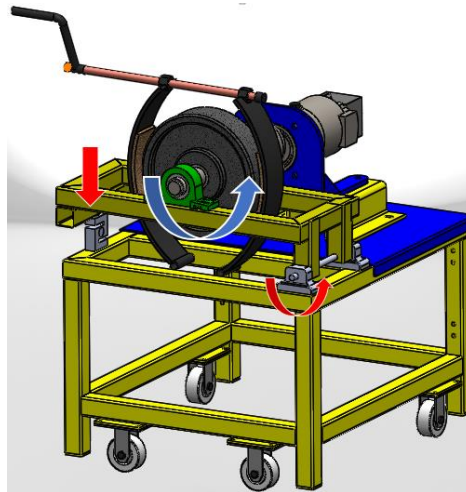
Cabe resaltar que la celda de carga en cuestión mide carga tanto a tensión como a compresión.

6.3 GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS

Al investigar sobre maneras para medir el torque en un motor se encontró algunas metodologías comunes, sin embargo y como ya se resalta anteriormente el objetivo es hacerlo usando la celda de carga tipo s, por lo tanto, es el factor crítico del diseño.

La primera alternativa estudiada fue incorporar la celda de carga en la estructura del módulo del motor hidráulico (Figura 8), de tal manera que se generara una fuerza de reacción en un apoyo cuando el motor girase, medir esa fuerza con la celda y al lado contrario permitir el giro.

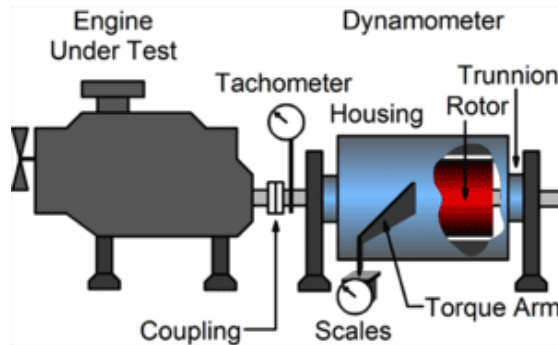
Figura 8. Configuración celda de carga como apoyo



Esta era una opción que estáticamente parecía fácil para el cálculo del torque, sin embargo, requería modificar el módulo del banco, cosa que no era bien vista además del gasto económico fuerte en material, trabajo de soldadura y pintura.

La otra opción era hacer un dinamómetro (Figura 9), que según la enciclopedia británica³² es un dispositivo para medir la fuerza torque o potencia.

Figura 9. Dinamómetro



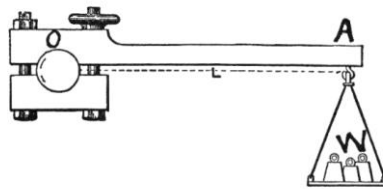
Fuente: <http://www.indydyno.com/what-is-a-dynamometer.php>

Hay varios tipos de dinamómetros, entre ellos los dinamómetros de absorción que a su vez destacan freno electromagnético, freno de agua y freno de fricción o freno Prony.

El freno Prony (Figura 10) trabaja fundamentalmente envolviendo una correa u otro elemento mecánico el eje de salida del motor y midiendo la fuerza transferida a la correa a través de la fricción.

³² DINAMOMETER. Encyclopædia Britannica. En Línea. Fecha de consulta [13/01/2016]. Disponible en: <http://www.britannica.com/technology/dynamometer>

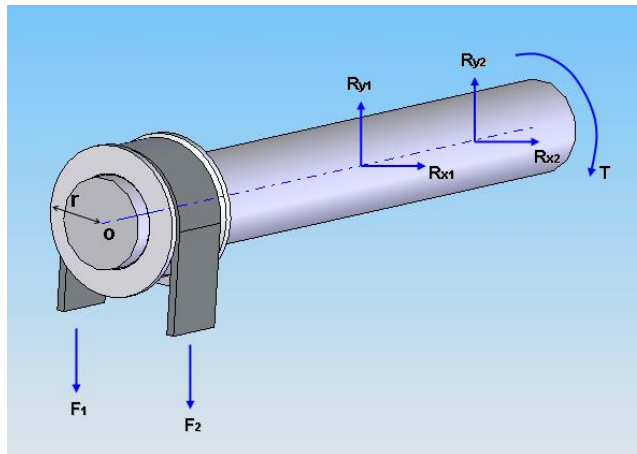
Figura 10. Esquema freno Prony



Fuente: <https://ztfnews.wordpress.com/2014/07/29/gaspard-de-prony-uno-de-los-72-nombres-de-la-torre-eiffel/>

La configuración de banda del freno Prony se vería en un diagrama de cuerpo libre como se ilustra en la figura 11:

Figura 11. Freno Prony configuración de banda

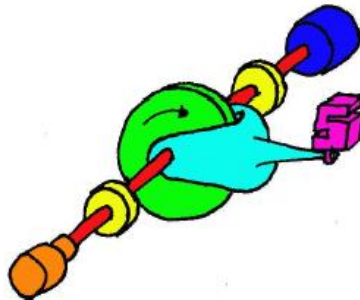


Fuente: Gutiérrez Laura. Diseño de un freno Prony

En donde se aprovecharía para conectar una de los dos finales de la correa con la celda de carga y la otra para generar la fuerza de frenado, y esta manera medir el torque. Sin embargo, buscando en el mercado vimos que no son muy comunes en el ámbito departamental y las que se encontraron no ofrecían las prestaciones que se necesitaban, además, incluyendo otros aspectos, se tendría que diseñar un mecanismo para accionar el freno.

Otra configuración del freno Prony es usando una mordaza con un freno de disco (Figura 12), es decir, adaptarle al eje de salida del motor un disco para freno, instalar una mordaza en la que se involucraría la celda de carga en el bastidor que sostenga la mordaza que al accionarse y frenar se intenta rotar y se puede medir una fuerza puntual, la cual nos permite hallar el torque.

Figura 12. Freno Prony Configuración con disco de frenado y celda de carga



Fuente: Gutiérrez Laura. Diseño De Un Freno Prony Para La Medición De Potencia

6.4 SELECCIÓN DE ALTERNATIVA

Para seleccionar la mejor alternativa, se realizó tomando varios aspectos en cuenta y se resume en la siguiente tabla.

Para la elaboración de la tabla se tomó en cuenta la opinión de los dos diseñadores, se sacó un promedio y se le asignó un peso específico a cada ítem.

Tabla 2. Tabla decisión alternativas.

Evaluación de alternativa para sistema medición de torque																
Criterio	Peso de importancia criterio	Alternativas														
		Celda de carga en la estructura				Freno Prony correa				Freno Prony Mordaza						
		D1	D2	P	Valor	D1	D2	P	Valor	D1	D2	P	Valor			
Capacidad de frenado	12	5	6	5.5	66	7	7	7	84	8	7	7.5	90			
Comerciability de las partes	15	9	8	8.5	127.5	6	4	5	75	9	10	9.5	142.5			
Costos	8	9	7	8	64	8	8	8	64	6	7	6.5	52			
Facilidad de mantenimiento	8	7	8	7.5	60	7	8	7.5	60	7	7	7	56			
Variacion, flexibilidad de usos	8	6	5	5.5	44	7	6	6.5	52	8	7	7.5	60			
Velocidad de trabajo	8	8	9	8.5	68	6	7	6.5	52	8	9	8.5	68			
Capacidad de disipación de calor	8	9	9	9	72	6	6	6	48	7	8	7.5	60			
Posibilidad de variar la fuerza	8	9	10	9.5	76	7	5	6	48	8	7	7.5	60			
Facilidad de ensamble	12	6	4	5	60	7	6	6.5	78	7	8	7.5	90			
Motivación por parte de los diseñadores	8	6	4	5	40	6	6	6	48	7	9	8	64			
Accionamiento	5	7	8	7.5	37.5	5	6	5.5	27.5	8	9	8.5	42.5			
	100	Total				715	Total				636.5	Total				785

Bajo los criterios expuestos en la tabla, la selección fue realizar un freno Prony con un freno de disco, que entre sus ventajas se encuentra la facilidad para conseguir los componentes, la facilidad de accionamiento, ya que es hidráulico y la capacidad de frenado.

6.5 MODELO DE CÁLCULO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

Para el cálculo del freno y selección de los componentes partiremos bajo la premisa de estimar potencias del sistema a frenar y de un freno de un elemento conocido, fácil de conseguir e instalar y económico. El análisis por energías es el siguiente:

$$E_{sist} = E_{In} + E_{rot}$$

Donde:

E_{sist} = Energía total del sistema.

E_{In} = Energía inercial del volante, eje y motor hidráulico.

E_{rot} = Energía producida por el motor hidráulico.

Ahora, la energía inercial la estimaremos así:

$$E_{In} = \frac{1}{2} I * \omega^2$$

Donde:

I = Inercia del conjunto

ω = Velocidad del eje.

Nota: En la inercia del conjunto, asumimos un valor de $1 \text{ [kg/m}^2\text{]}$, pues se conoce³³ el valor de la inercia del volante que es $0,49 \text{ [kg/m}^2\text{]}$. La velocidad de diseño del motor será de 1000 RPM, lo que equivale a $104,72 \text{ [rad/s]}$. El tiempo aproximado³⁴ que se demora el sistema en llegar a velocidad de régimen el $t_1 = 2,4 \text{ [s]}$

$$E_{In} \cong 5,48 \text{ [kJ]}$$

$$P_{in} \cong 2,283 \text{ [kW]}$$

Ahora, para la potencia entregada por el motor hidráulico, se usan los principios de potencia fluida. Primero hallamos el caudal (Q), y luego estimamos la potencia asumiendo un ΔP de 1000 [psi]. No se toma ninguna eficiencia hidráulica en los cálculos de potencia como parte de un factor de seguridad.

$$Q = \frac{C_m \text{ [in}^3\text{/rev]} * \omega \text{ [RPM]}}{231}$$

³³ NIÑO Arnulfo. Rediseño y construcción de un banco de pruebas para diagnóstico de fallas en una Hidrotransmisión bomba variable – motor fijo. Tesis de grado, UIS pág. 122.

³⁴ *Ibíd.*, pág. 122.

Donde

$$C_m = 3.15 \left[\text{in}^3 / \text{rev} \right] \text{ Desplazamiento del motor.}$$

$$Q \cong 13,63 \text{ [GPM]}$$

$$Pot_{hid} = (\Delta P * Q) / 1714$$

$$Pot_{hid} \cong 7,95 \text{ [HP]} = 5,93 \text{ [kW]}$$

Por lo tanto, la potencia total a frenar por el sistema será:

$$Pot_{sistema} \cong 8.213 \text{ [kW]}$$

Ahora bien, esta potencia será la que se debe frenar. Se propone usar un freno de disco equipado en motocicletas. Para eso se hizo la estimación de la potencia capaz de disipar un freno de esta clase.

$$E_{cin} = \frac{1}{2} m * V^2$$

Donde

m= masa

V= Velocidad alcanzada por la motocicleta

Nota: Para la masa (m), asumimos un valor combinado entre pasajeros y motocicleta de 300 kg, una moto de cilindrada 150cc pesa alrededor de 120 kg. La velocidad asumida fue 100 km/h que equivale a 27,78 m/s y el tiempo aproximado que le toma a un motociclista frenar una motocicleta con estas condiciones el 10 [s].

$$E_{cin} \cong 115,8 \text{ [kJ]}$$

$$Potencia = \frac{E}{t}$$

$$Pot_{Frenado} \cong 11,58 \text{ [kW]}$$

Dado que:

$$Pot_{Frenado} \geq Pot_{sistema}$$

Concluimos que el freno de disco de una moto con las características ya expuestas está capacitado para frenar el sistema y ser utilizado en él.

Recalculando, tomando la presión como variable, se puede hallar lo siguiente:

$$\Delta P_{m\acute{a}x} \cong 1600 \text{ [psi]}$$

Así el factor de seguridad será:

$$F_s \cong 1.6$$

Ahora, para la selección de los componentes de freno (Figura 13), a saber, bomba de freno, disco y mordaza (caliper), se investigó en el mercado local una motocicleta de las características expuestas, se encontró que una motocicleta tipo Suzuki GS150r cumple, por lo tanto, seleccionamos los componentes del freno de esta motocicleta.

Figura 13. Sistema freno disco motocicleta



Fuente:<http://www.harryscooters.com/catalogo.php?cPath=23&osCsid=6jqe6n335u5vqvelvmkeqn09n1>

6.6 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

Para adaptar el montaje del diseño que se seleccionó, se requirió de revisar y rediseñar algunos elementos que ya estaban contruidos. Sin embargo, se intentó, en lo posible, dejar el diseño del banco original y no alterar su estructura.

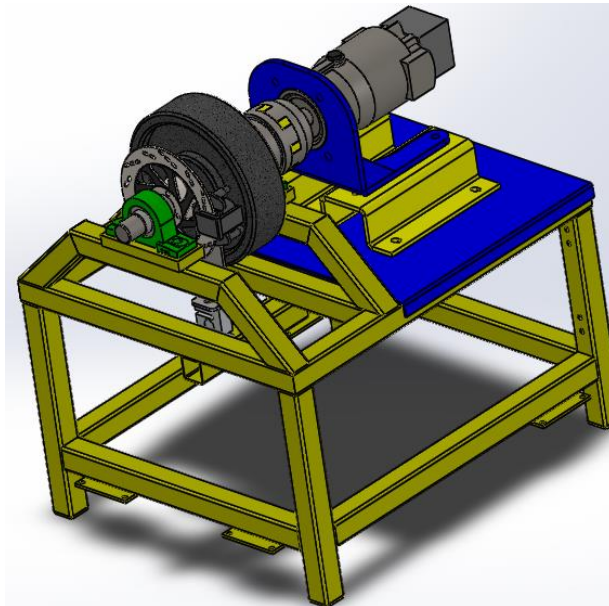
Al seleccionar el freno Prony, usando el freno de disco de una motocicleta se observó que si rediseñábamos la distribución en el eje donde se encontraba el volante de inercia a la salida del motor, se podía situar junto al volante. Hace falta mencionar que un motivo por el que se optó por mejorar el freno existente fue porque el freno anterior de zapata no servía.

Así que se decidió montar el freno del disco junto al volante de inercia en el mismo eje, eje que fue revisado para ver que cumpliera los nuevos requerimientos y se

pudo comprobar que el diámetro mínimo necesario es de 30 mm y en realidad este eje tiene 40 mm en su zona crítica.

A continuación, se ilustra el diseño implementado.

Figura 14. Módulo motor hidráulico con freno de disco

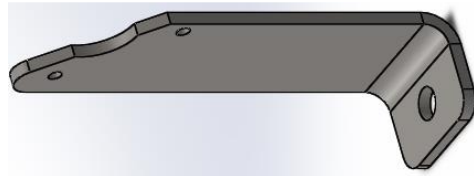


Para adaptar la celda de carga como parte del ensamble del bastidor que sostiene la mordaza de freno se diseñó la placa que une la celda de carga con la mordaza, un elemento a dos fuerzas que sirve como apoyo y para transmitir la fuerza. Éste es uno de los elementos que fue necesario diseñar, pues lo demás, como se observa, se seleccionó del mercado y se calculó que cumpliera (freno de disco, mordaza, disco, bomba de freno, etc.).

La placa de apoyo se diseñó partiendo de un diseño puramente geométrico, que cumpliera con las relaciones de espacio, se trata de una lámina HR A36 doblada de espesor de 6 mm, el espesor se eligió así porque la mordaza, su bastidor es también

una lámina de este mismo calibre, así que se infiere que soporta las cargas a transmitir, que no son muy altas. Con una presión de 1000 [psi], el motor hidráulico entrega según el catálogo un torque de aproximadamente 57 [N-m], lo que produciría con un radio de 22 [cm] (entre el centro del eje y el radio efectivo de frenada) una fuerza de 260 [N], que produciría un esfuerzo de menos de un Mega pascal. El límite elástico del material es 250 [Mpa]. Por lo tanto, está sobredimensionado el espesor, pero se mantiene por estética. La placa de apoyo la podemos ver en la siguiente figura.

Figura 15. Placa de apoyo



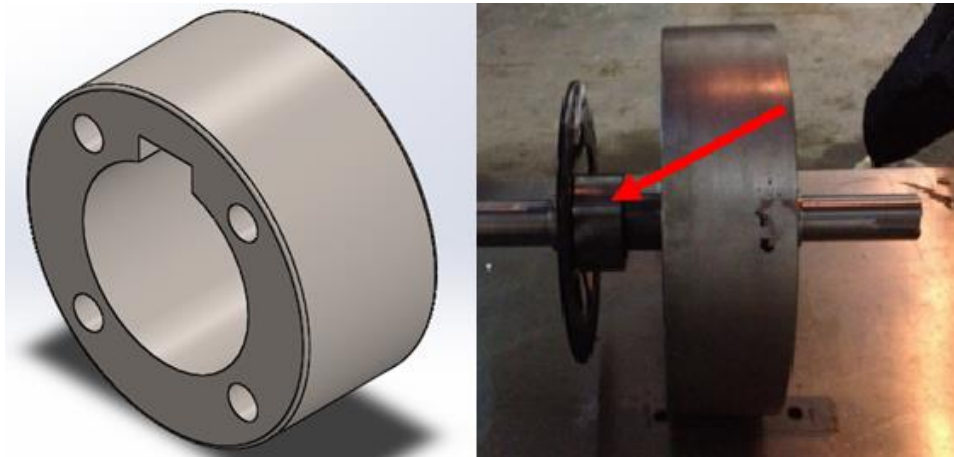
El propósito de esta placa era únicamente sostener la mordaza y transmitir la fuerza de frenado a la celda de carga.

La placa como se dijo, es una lámina de 6 mm cortada a medida con oxiacetileno en Láminas y cortes LTDA, y doblada a 90° en Corpliegues SAS, sitios especializados en este tema ubicados en la ciudad de Bucaramanga.

Para soportar la celda de carga fue necesario soldar un tramo de perfil a la estructura del módulo del motor hidráulico, para esto se recibió la colaboración del taller de mecánica de la escuela y su sección de soldadura. Así mismo se utilizaron los taladros de banco y manuales del taller para hacer diversas perforaciones necesarias.

El otro elemento a diseñar fue el acople entre el eje y el disco de freno (Figura 16), que consta de un cilindro hueco, como bloque base, al cual se le realiza un cuñero, donde se alojará la cuña que transmite la potencia y unas perforaciones roscadas para atornillar el disco.

Figura 16. Acople eje-disco



Su construcción se llevó a cabo en Fresados Santander, una empresa certificada ICONTEC, pues las tolerancias eran importantes para esta pieza, ajuste deslizante en el eje y perforaciones roscadas de buena calidad para fijar el disco.

Sus dimensiones están dadas principalmente por requerimientos geométricos y de espacio y tanto su plano como el de la placa de soporte se pueden consultar en el anexo 2.

Además, fue necesario instalar el sistema hidráulico y bomba del freno, para eso se soldó un tubo de 20 mm de diámetro por 30 cm de largo, ubicado en el módulo de la bomba hidráulica, en la parte inferior desde donde se podrá accionar el freno de la misma manera que se acciona con una motocicleta.

También fue necesario adicionar un elemento al módulo, para soportar la celda de carga.

Figura 17. Perforado de elemento que sostiene la celda de carga



Por último, se purgó el sistema de freno, introduciéndole el líquido al sistema, se usó líquido de frenos tipo DOT3, que es genérico para este tipo de frenos.

Así pues, en la figura 18 podemos ver el montaje final del sistema.

Figura 18. Sistema completo final



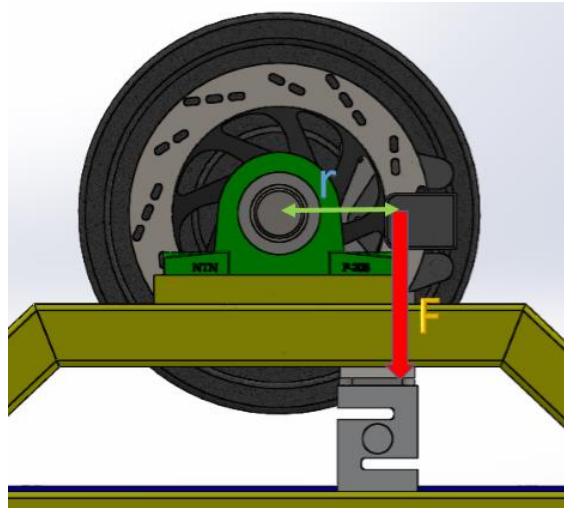
Se pueden consultar los costos generales del proyecto en el anexo 13.

6.7 ESTIMACIÓN DEL TORQUE

El objetivo de este diseño es poder registrar torque. Sin embargo, lo que realmente se mide es un valor de fuerza, pues la celda de carga mide fuerza, a compresión o a tensión.

Sin embargo, como es conocido el torque se estima por el producto entre una fuerza y un brazo de momento o radio. Al conocer la fuerza medida por la celda de carga, solo resta saber el brazo de momento.

Figura 19. Cálculo del torque



La distancia r , se halla de calcular un radio efectivo de frenado, llamado así por la literatura, y equivale a:

$$r_{efectivo} = \frac{r_{interno} + r_{externo}}{2}$$

Donde los radios equivalen por supuesto, a los radios del disco de freno.

$$r_{efectivo} = 22[\text{cm}]$$

Así tenemos que el torque de salida del motor es igual a:

$$\tau = r * F$$

Donde:

r = radio efectivo

F = fuerza registrada por la celda de carga.

Esta fuerza se obtiene por medio de la celda de carga, se filtra y se adquiere por medio del DAQ y LabVIEW. Más adelante se darán detalles de éste proceso. El programa en LabVIEW que se realizó para ésta medición entrega directamente en valor del torque en unidades de Newton-metro.

6.8 PRUEBAS

Una vez finalizado el proceso de adecuación del sistema de medición de torque, se procede a realizar pruebas que verifiquen el funcionamiento.

De acuerdo a la metodología llevada, la bomba no estaba conectada con el motor. Por eso para probar el sistema de medición de torque, se procedió a realizar esta conexión.

Como se explica en el capítulo de adquisición de datos, se desarrolló un programa en LabVIEW para adquirir la señal de fuerza captada por la celda de carga, el cual capta la señal de voltaje y la traduce en un valor de fuerza medido en Newton. Para esta calibración se llevaron a cabo dos procesos; una calibración se realizó en el laboratorio de resistencia de materiales de ingeniería civil en el banco de pruebas para probetas a compresión, se sometió con cargas de 1 kN, hasta 10 kN.

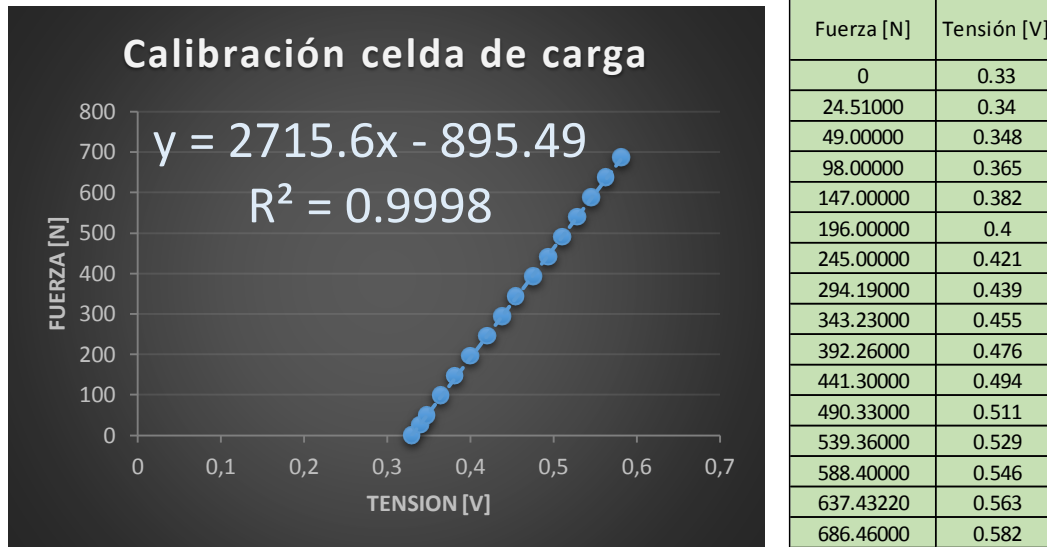
Figura 20. Calibración celda de carga a compresión.



Sin embargo, este rango de calibración no es el óptimo, ya que las fuerzas a medir son menores a este rango de calibración, por lo que se optó por calibrar la celda de carga manualmente, usando pesas conocidas de gimnasio y viendo el comportamiento de la celda.

A continuación, vemos los resultados de esta última calibración, que si permite usar la celda en el rango de fuerzas que se irá a trabajar.

Figura 21. Calibración celda de carga



El programa de LabVIEW está diseñado para poder ver el torque estimado y la fuerza medida por la celda de carga y permite guardar en archivos .xlsx (Excel) el valor del torque en el tiempo.

Teniendo en cuenta que:

$$T = \frac{C_m * \Delta P}{2\pi}$$

Para una presión de 500 psi el torque teórico correspondiente será aproximadamente 17.73 N-m, tomando como $C_m = 2.2 \text{ in}^3/\text{rev}$, y una eficiencia de motor de $\eta=0.90$.

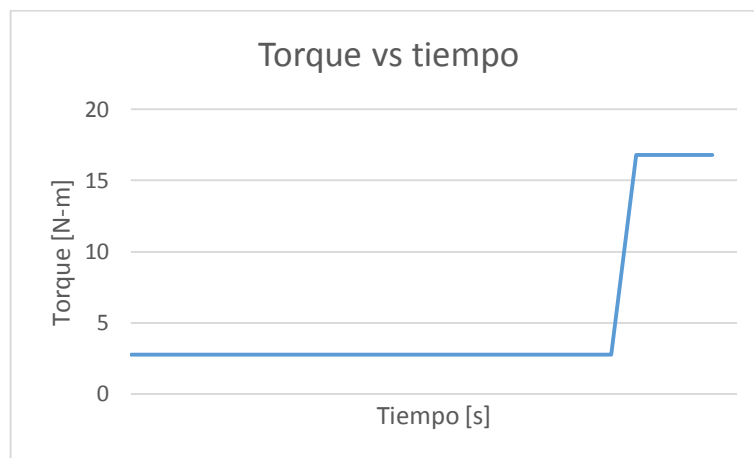
La prueba consistió en capturar la señal de fuerza, estando girando el motor y aplicando el freno para ver que torque desarrollaba el sistema. El torque máximo

capturado es de aproximadamente 16.8 N-m. Esto significa que existe un error del 5%, entre el valor teórico y el valor estimado por el sistema.

Cabe resaltar que el torque medido no corresponde al torque total desarrollado por el motor ya que hay pérdida de energía en los apoyos (rodamientos) del eje, por lo tanto el sistema diseñado hace una estimación del torque real.

Los resultados de la prueba son:

Figura 22. Grafica de torque vs tiempo



En la gráfica se puede apreciar el salto en el valor del torque medido, correspondiente al momento en el tiempo que se aplica el freno para medir torque.

Así concluimos pues que el sistema es funcional y cumple con los requerimientos mínimos de diseño.

7. SISTEMA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos (DAQ) empieza desde la presencia de una señal física o un fenómeno físico que perturba el estado inercial de un objeto en estudio. Este fenómeno puede ser una variación de temperatura, pulso cardiaco, aumento o disminución de velocidad, intensidad lumínica, una fuerza aplicada, entre otras. Un sistema DAQ eficaz tiene la capacidad de procesar varias de estas señales a la vez.

En la industria, a los componentes físicos vitales en la producción se les da una mayor atención para poder alargar sus ciclos de vida, esto requiere un monitoreo constante o sistemático de algunas variables físicas de especial interés. Estas variables revelan el estado y la condición actuales de la máquina sin necesidad de detener el proceso para el cual ha sido asignada. Es aquí donde cobra un alto valor la adquisición de datos en el campo de la ingeniería.

Éste caso particular se centrará en el registro de la presión, caudal de pérdidas y vibración de una bomba hidráulica de pistones axiales.

La lectura de estas importantes variables se hace para monitorear el estado actual de la bomba. Es con base en estos datos que se toman decisiones importantes con respecto al funcionamiento de dicho componente (referente al mantenimiento predictivo). Por esto es muy importante que el sistema de adquisición de datos sea confiable, eficaz y tenga una buena precisión. Ya que, si la información adquirida es correcta y precisa, el mantenimiento predictivo será acertado y su acierto se verá reflejado en la disminución de los costos de mantenimiento y en el aumento de la producción y vida de trabajo de las máquinas en cuestión.

7.1 CADENA DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable.

Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable. En la figura 23 puede apreciarse la cadena general de un sistema de adquisición de datos.

Figura 23. Cadena general de adquisición de datos



Fuente: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

El software y hardware que se utilizó es de la empresa National Instrument ya que el fuerte de esta empresa es la adquisición de datos y cuentan con un amplio portafolio de productos. Las herramientas de National Instrument que se utilizaron fueron: NI USB-6215, NI USB-9234, Measurement & Automation Explorer (MAX), NI-DAQmx y NI LabVIEW 2013. Más adelante se detallan cada una de estas herramientas.

7.2 SENSORES Y TRANSDUCTORES

Para capturar las señales más esenciales de la bomba se utilizó un caudalímetro en la tubería de drenaje (A), dos transductores de presión, uno en el puerto A de salida de la bomba (B) y otro para capturar las variaciones de presión de la bomba de precarga (C) (figura 24), y un acelerómetro que ubicamos en cuatro puntos estratégicos. En la siguiente imagen podemos apreciar dentro de círculos rojos los puntos donde se tomaron las vibraciones mecánicas.

Figura 24. Puntos de medición de vibraciones en la bomba



7.2.1 Caudalímetro

Se utilizó un caudalímetro del fabricante Flow Metrics modelo FM-8 (Figura 25).

Figura 25. Caudalímetro



Este instrumento es de tipo turbina especial para aplicaciones hidráulicas y proporciona medidas digitales muy confiables. Su turbina es de baja inercia lo que le da un tiempo de respuesta bastante rápido y lo hace ideal para mediciones de flujo cambiante. (Ver anexo 11). Sus principales especificaciones son:

- Diámetro ½ '
- Rango de flujo 1-10 GPM
- Arroja una señal de salida de pulsos.
- 10 V de alimentación.

Este instrumento ya había sido utilizado en un proyecto y había sido calibrado anteriormente. La ecuación para la cual se realizó la verificación es la siguiente:

$$Q = 0.0014 * F + 0.0709$$

Con el banco encendido la lectura del caudalímetro era de 3 kHz lo cual corresponde, según la ecuación, a 4.27 GPM. Para verificar el caudal se utilizó una probeta de 250 mL para medir el volumen de pérdidas de la bomba; esta medida se realizó por 10 segundos y el resultado fue de 4.43 GPM (valor promedio de 4

mediciones). Con un error del 3.74% se considera aceptable esta ecuación para los fines prácticos de este proyecto.

7.2.2 Transductores de Presión

7.2.2.1 Transductor en el Puerto A de la Bomba. Para medir la presión de descarga de la bomba utilizamos un transductor de presión del fabricante WIKA modelo ECO-1. Para más detalles, por favor consultar el anexo 10.

Figura 26. Transductor de Presión WIKA



Fuente: Catálogo WIKA, anexo 10

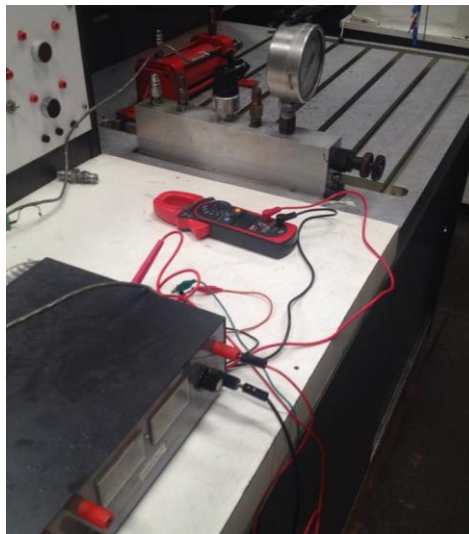
La bomba es bidireccional pero solo es de interés presurizar el puerto donde se encuentra el transductor. Por esta razón se limitó el giro de la bomba a una sola dirección.

Sus principales especificaciones son:

- 1-3000 PSI
- Señal de salida 0-10V
- 14-30 V de alimentación

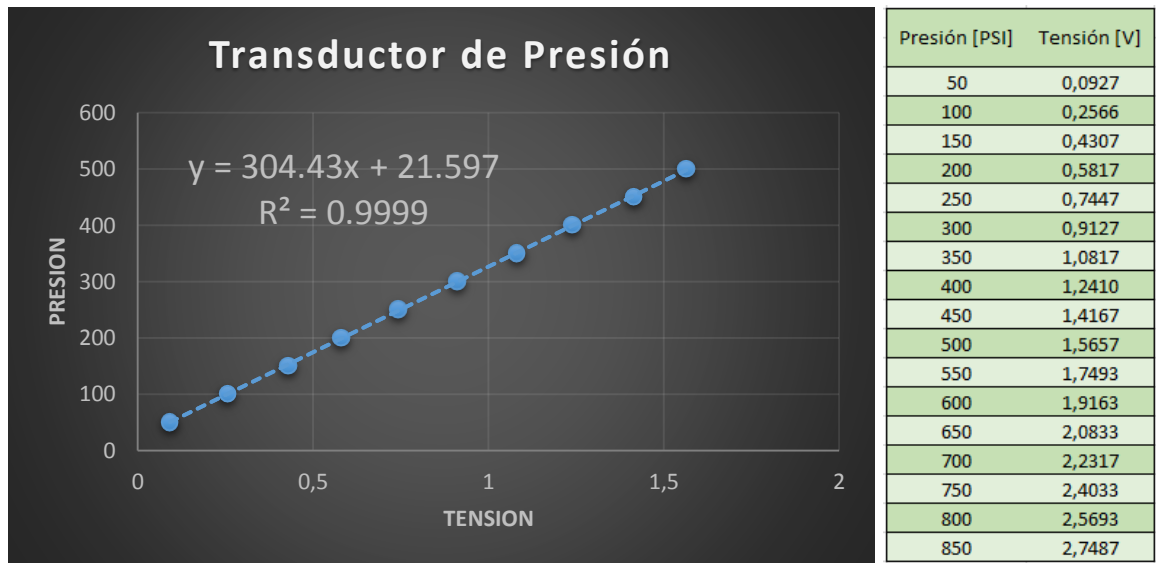
La calibración se realizó en el laboratorio de potencia fluida de la escuela de Ingeniería mecánica en el banco hidráulico Digiac con la instrumentación que se muestra en la imagen 27. Para la calibración y para la toma de datos utilizamos un voltaje de alimentación de 20 [V], el cual siempre se verificaba con un multímetro digital antes de comenzar a adquirir datos.

Figura 27. Calibración transductor WIKA



Se tomaron datos para incrementos de presión de 50 [psi] en un rango de 50-850 [psi]. La ecuación obtenida se observa a continuación en la gráfica de calibración.

Figura 28. Calibración Transductor de presión WIKA



7.2.2.2 Transductor para la Presión de Precarga. Para medir las variaciones de presión de la bomba de precarga se utilizó un transductor de la serie MSP300 del fabricante MSI Measurement Specialties. Para más detalles del funcionamiento y especificaciones, por favor consultar el anexo 9.

Figura 29. Transductor de Presión MSI



Fuente: Catálogo MSI, anexo 9.

Sus principales especificaciones son:

- 1 - 2500 PSI

- Señal de salida 0.5 - 4.5 V
- 5 V de alimentación

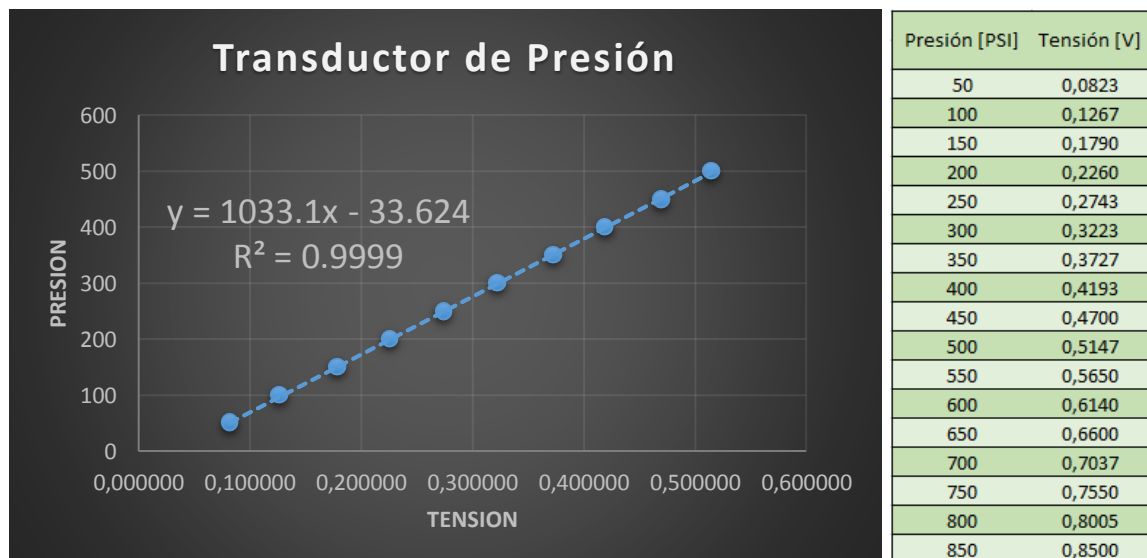
El procedimiento de calibración de este transductor fue similar al del transductor WIKA con la diferencia de que, al no ser tan robusto ni versátil, el transductor MSI requiere de un tratamiento de señal, para lo cual se utilizó una tarjeta industrial de acondicionamiento de señal (figura 30), que también se usa para el flujómetro.

Figura 30. Tarjeta acondicionamiento de señal



El montaje de la calibración se ilustra a continuación junto con los resultados de la misma.

Figura 31. Calibración transductor



7.2.3. Acelerómetro. Para capturar las vibraciones de la bomba se utilizó un acelerómetro del fabricante PCB Piezotronics modelo 352C33. Este acelerómetro tiene una sensibilidad de 100 mV/g, un rango de frecuencia de 0.3 a 15000 Hz, su frecuencia de resonancia está por encima de los 50 kHz y tiene una no linealidad menor o igual al 1%. (Para más información ver el anexo 3).

Figura 32. Acelerómetro



Fuente: Catálogo (anexo 3)

7.3 HARDWARE DAQ

En este trabajo se utilizaron dos tarjetas de adquisición de datos de National Instrument: NI USB-6215 y NI USB-9234, esta última incluye el chasis NI USB-9162 para conexión al puerto USB. Estas tarjetas actúan como una interfaz entre un PC y las señales del mundo exterior. El hardware DAQ toma la señal análoga de los sensores, la acondiciona y la convierte en una señal digital para que pueda ser interpretada por un computador. La comunican con el computador es a través del bus de la PC.

La NI USB-6216³⁵ (Figura 33) es un módulo de adquisición de datos multifunción de la Serie M energizado por bus que está optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo más altas. Está diseñado específicamente para aplicaciones móviles o con restricciones de espacio y cuenta con dos tipos de conexión: Plug and play o conectividad directa con tornillo. Posee 16 entradas analógicas (16 bits, 400 kS/s) y 2 salidas analógicas (16 bits a 250 kS/s), 32 salidas y entradas digitales y cuenta con un rango de señal de entrada de -10V – 10V.

Figura 33. NI USB-6216



Fuente: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/207099>

La NI USB-9234 (Figura 34) Es una tarjeta de la serie C para adquisición de señal dinámica para realizar medidas de frecuencia de audio y vibración de alta precisión. Cuenta con 4 conectores BNC donde cada uno de ellos puede conectarse a un acelerómetro o micrófono. Tiene una resolución de 24 bits, el rango de tensión de entrada es de -5V – 5V, filtros anti-aliasing, rango dinámico de 102 dB y una máxima velocidad de muestreo de 51.2 kS/s.

³⁵ NATIONAL INSTRUMENT. Productos y servicios. [En línea]. Disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/207099>

Figura 34. NI USB-9234



Fuente: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/204481>

7.4 EQUIPO PORTATIL Y SOFTWARE PARA LA AQUISICIÓN DE DATOS

Para que un computador pueda procesar, visualizar y almacenar señales del mundo exterior debe poseer un software programable, que además de esto, le permita controlar los dispositivos DAQ. Dependiendo de la aplicación se utilizan PC de escritorio, portátiles o PCs industriales. En nuestro caso usamos una laptop por su portabilidad. Este ordenador es un Hewlett Packard con un procesador Intel CORE i5 y memoria RAM de 4.00 GB. A este equipo se le acondicionó un software especializado de la firma NI que se describe a continuación:

- NI-DAQmx: Es un software controlador que permite la conexión entre el hardware DAQ y el software de programación (LabVIEW).
- Measurement & Automation Explorer (MAX): Este programa busca los dispositivos DAQ conectados y verifica que estén correctamente enlazados a la PC. También permite ensayar el desempeño de los sensores y transductores.
- NI LabVIEW 2013: Software de programación, tiene una sintaxis de programación gráfica que facilita visualizar, crear y codificar sistemas de ingeniería, LabVIEW ayudar a reducir tiempos de pruebas y facilita la recolección de datos.

7.5 DESARROLLO DEL PROGRAMA EN LabVIEW

El programa que se desarrolló tiene el fin de mostrar las señales ya en su correspondiente unidad de medida y la transformada rápida de Fourier para el respectivo análisis del espectro de frecuencia; también está habilitado para guardar los datos procesados.

7.5.1 Panel Frontal. El VI principal desarrollado contiene unos SUBVI's que corresponden a los paneles frontales referentes a las señales del transductor de presión en el puerto A, transductor de presión de la precarga, acelerómetro, celda de carga y caudalímetro. Una vez se ejecute el programa este empezará a procesar la señal que se desea analizar. Para ello el usuario deberá dar click sobre uno de los botones principales que tienen la figura de cada respectivo instrumento (figura 35), entonces, será llevado al panel frontal donde podrá observar la señal, el espectro de frecuencia y la señal en su respectiva unidad de medida.

Figura 35. Botones Principales Prediseñados del Panel Frontal Principal



Si desea, también puede guardar los valores que se están midiendo en tiempo real dando click en el botón "Guardar" (debe volver a dar click en el botón cuando ya no

quiera adquirir más datos). Para observar otro instrumento debe dar click en el botón “Volver” y seleccionar la siguiente señal a analizar. Para finalizar debe volver al panel frontal principal y dar click sobre el botón “STOP”. A continuación, se muestras los diferentes paneles frontales.

Figura 36. Panel Frontal Principal



Figura 37. Panel Frontal del Caudalímetro y de la celda de carga



Figura 38. Panel Frontal del Transductor de Presión de salida y precarga

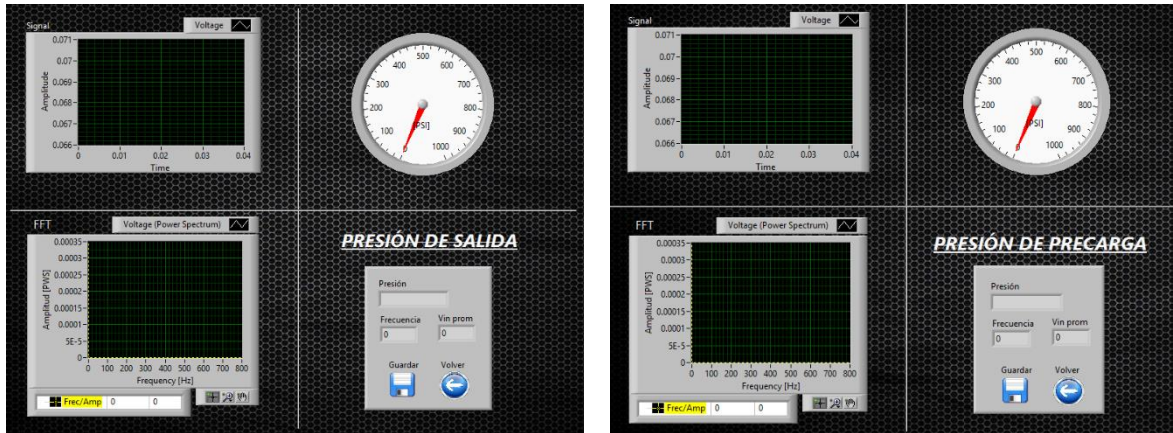
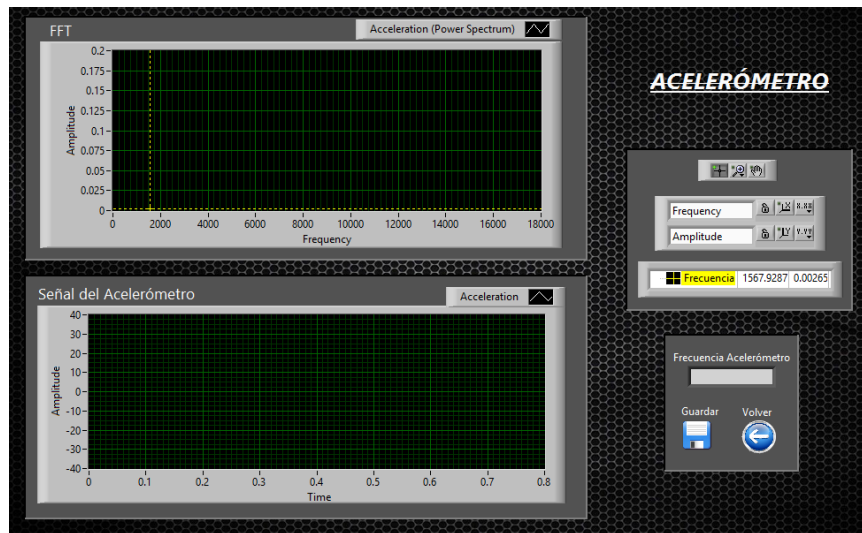


Figura 39. Panel frontal del acelerómetro.

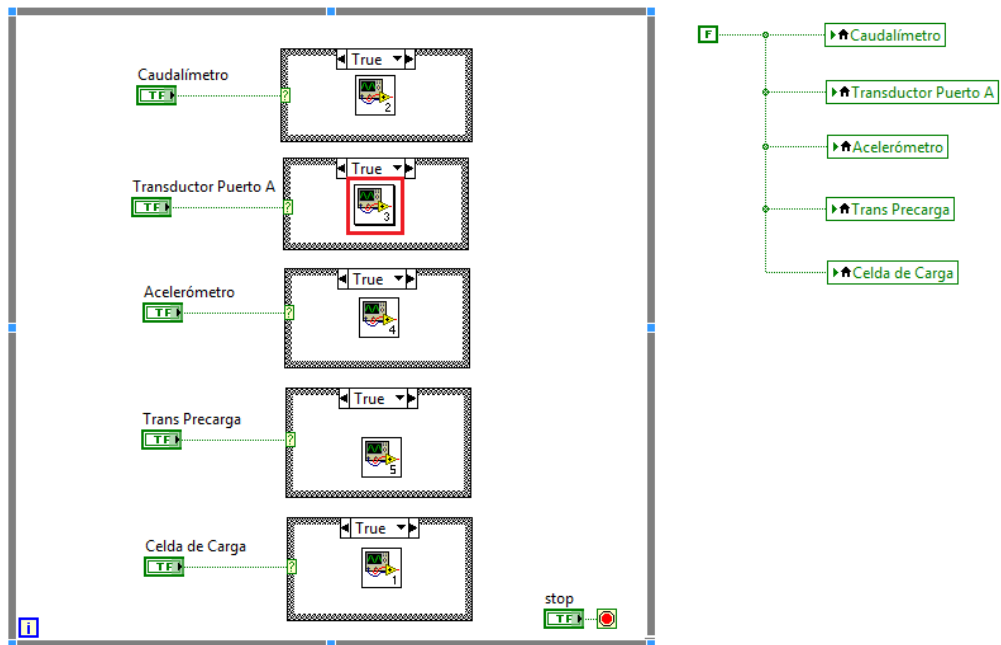


7.5.2 Diagrama De Bloques. La programación para los 5 instrumentos de medida es muy similar por lo cual detallaremos solo la del Transductor de presión del puerto A.

El diagrama de bloques principal contiene la programación de las 5 señales (Figura 40). Para acceder a la programación del transductor de presión se da doble click sobre el subvi que se encuentra dentro del Case Structure (para información sobre

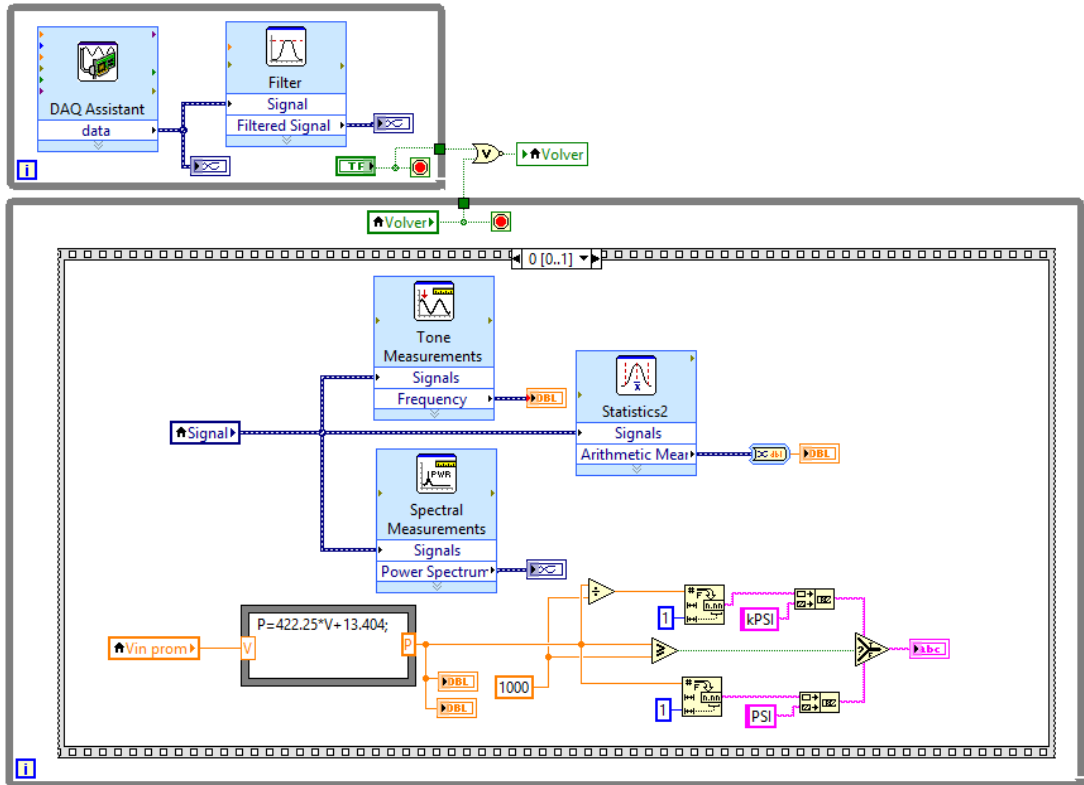
estas estructuras de programación y otras más, consulte el manual del usuario de LabVIEW³⁶) correspondiente a esta señal (indicado con un marco rojo en la figura 40). Se abrirá la ventana emergente que se muestra en la figura 42 que corresponde al diagrama de bloques desarrollado para la señal de dicho transductor.

Figura 40. Diagrama de Bloques Principal



³⁶ USER MANUAL LabVIEW. [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>

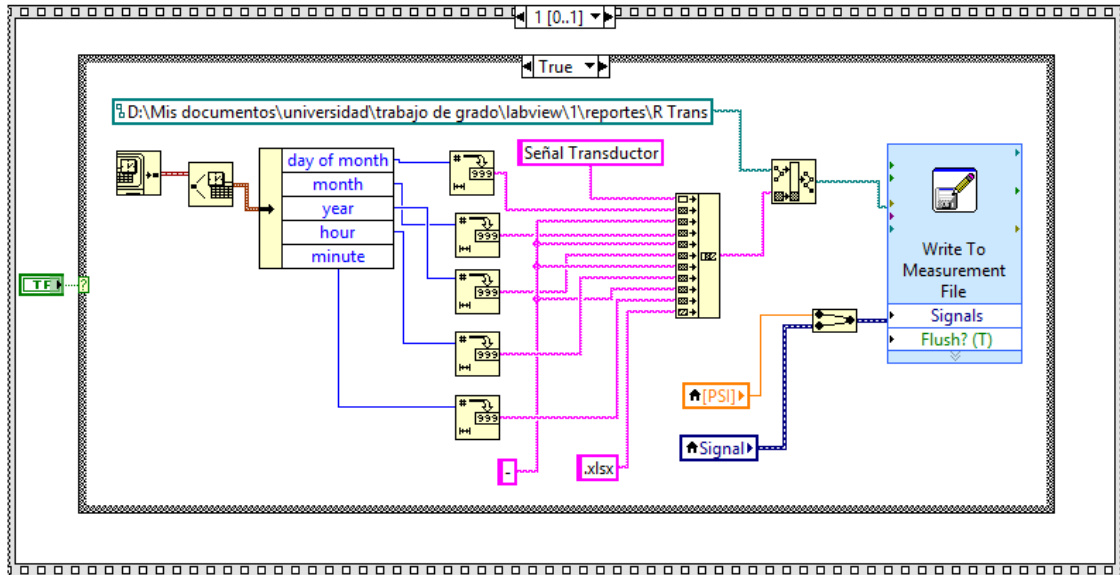
Figura 41. Diagrama de Bloques del Transductor de Presión



En el While Loop superior ingresa la señal, esto lo hace el VI DAQ Assistant y se aplica un filtro por software. En el segundo While Loop se hace la programación necesaria para obtener, de la señal, la presión ya sea en PSI o kPSI, el espectro de Presión y la señal proveniente de la tarjeta NI USB-6216.

Dentro del While Loop inferior se encuentra un Stacked Sequence Structure, esta estructura de programación consiste en uno o más subdiagramas que se ejecutan secuencialmente. Este programa contiene dos secuencias. La secuencia 0 es la que se mencionó anteriormente y la secuencia 1 es referente al guardado de los datos (figura 42).

Figura 42. Programación para guardar la señal



Aquí es donde se programa para que el guardado se realice automáticamente, solo mediante un click. En este subdiagrama se encuentra un Case Structure y el VI Write To Measurement File. El Case Structure permite ejecutar lo que se encuentra dentro una vez la señal del control booleano Guardar sea TRUE y se deja de ejecutar cuando esta señal vuelva a ser FOLSE (esta configuración le da la libertad al usuario de adquirir datos por el tiempo que él desee).

Y el VI Write To Measurement File permite guardar las señales que se le asignen. Este VI está configurado para guardar automáticamente en formato .xlsx. El documento queda guardado con el nombre de la señal, la fecha y la hora en la dirección que se le asigna en la casilla base path del VI Build Path.

8. METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN BOMBAS HIDRÁULICAS DE PISTONES AXIALES

Este proyecto se enfoca en la detección y análisis de fallas asociadas al desgaste de los platos de presión.

8.1 TOMA DE DATOS

8.1.1 Configuración del Banco para la toma de Datos La toma de datos en éste proyecto es una parte sumamente importante, pues los datos son el fundamento del análisis que se quiere llevar a cabo.

Cabe aclarar que la toma de datos se realizó en el banco de pruebas, localizado en el sótano del laboratorio de turbo máquinas hidráulicas y se efectuó estando conectada la bomba únicamente con el dispositivo generador de carga, en este caso el manifold, que consiste en dos válvulas de alivio cruzadas que se pueden tarar manualmente con una perilla. Con esta configuración se puede asegurar que la bomba siempre va a trabajar en las mismas condiciones de carga. El valor que se escogió fue 700 psi medidos en el manómetro correspondiente, y esta posición se mantuvo durante todas las mediciones, así garantizando para todas las condiciones el mismo nivel de resistencia.

Figura 43. Toma de datos



8.1.2 Metodología para la toma de Datos. La adquisición de datos se realizó con un patrón establecido el cual se repitió rigurosamente en todas las tomas para asegurar que los valores sean comparables.

La temperatura del aceite del banco nunca debe sobrepasar los 140 °F, porque el aceite comienza a degradarse, por esto y para garantizar una buena toma de datos, definimos un rango de temperatura de 110 ± 10 °F, y se monitoreaba con el indicador existente en el tanque de almacenamiento del aceite. Por este motivo, para tomar datos primero se encendía el banco, según las recomendaciones plasmadas en el anexo 5, y se dejaba unos 10 a 15 minutos mientras el sistema se estabilizaba y el aceite adquiría la temperatura deseada.

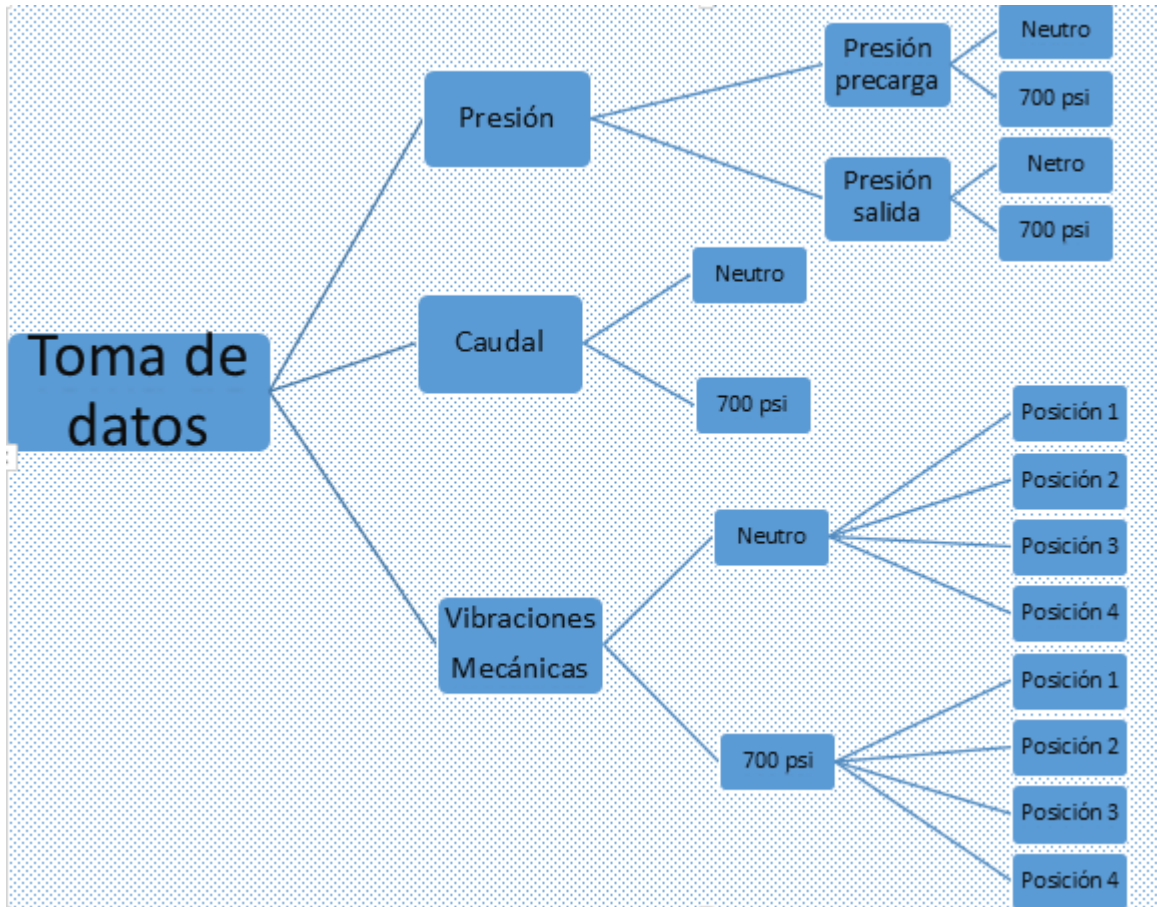
La adquisición de datos se llevó a cabo con los siguientes parámetros:

- Frecuencia de muestreo: 100ks/s, para datos de caudal y presión.
- Frecuencia de muestreo: 50ks/s, para datos de vibraciones.
- Se tomaron 65536 (2^{16}) datos por muestra, de acuerdo a Fourier.

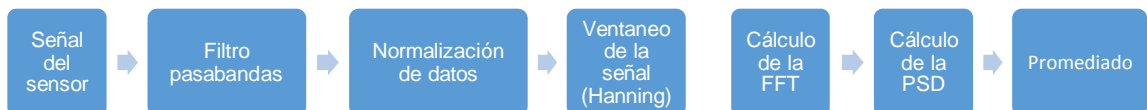
- Para el ventaneo de la señal se usó la venta Hanning.
- Se tomaron 15 muestras por variable.

Los datos según cada variable se tomaron como se ilustra en la siguiente figura.

Figura 44. Toma de datos



Los pasos a realizar para completar la metodología, consiste en hallar el espectro son los siguientes:



8.2 CONDICIONES DE DESGASTE (FALLAS INDUCIDAS)

Para el análisis se tenían que encontrar 6 condiciones que consistían en distintos niveles de eficiencia, los cuales están directamente relacionados con el desgaste en los platos de presión de la bomba. Para hallar estas condiciones se hizo una relación indirecta entre el aumento del caudal de pérdidas y la eficiencia volumétrica de la bomba, puesto que no se podía estimar, directamente, la eficiencia volumétrica ya que el caudal de salida de la bomba era una señal no medible.

Los platos de desgaste de la bomba (Figura 45) son: el plato de válvulas de acero (valve plate) y el plato de bronce (bearing plate).

Figura 45. Izquierda: Valve Plate. Derecha: Bearing Plate



Se llevaron a cabo dos procesos para generar las fallas en los platos: rectificado con lijas y torneado (desgaste).

El rectificado de los platos se llevó a cabo con un método de lijado profundo, con seis tipos de lijas, desde la más rugosa a la más fina (de la 120 a la 600), terminando con acabado espejo.

Figura 46. Rectificado y torneado de los platos



El otro proceso que se llevó a cabo para encontrar otra condición de eficiencia volumétrica, fue el de torneado, en el cual se simuló un desgaste en los platos, por donde era conocido que aparecerían fisuras de desgaste.

De esta manera se encontró cada una de las condiciones de eficiencia que se querían hallar.

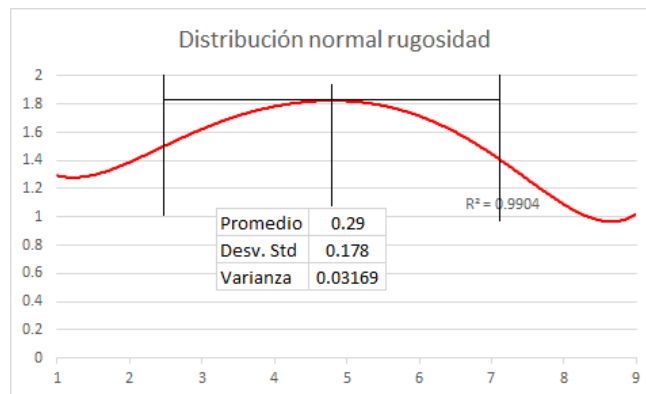
Para llevar un control de las modificaciones que se realizaban, se recurrió a medir la rugosidad en los platos. Para este proceso se contó con el equipo Rugosímetro Mitutoyo SJ-210, perteneciente a la Universidad Industrial de Santander, y en poder de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Figura 47. Medición de rugosidad



Se calibró el equipo de acuerdo a las instrucciones dadas por el manual de usuario (ver anexo 6); después se tomaron medidas en diferentes lugares de los platos usando la norma ISO 1997 y se evidenció que existe una relación entre la eficiencia volumétrica con la rugosidad promedio en los platos. El parámetro de comparación fue la rugosidad promedio R_a . Para más detalles del proceso de medición de la rugosidad, consultar el anexo 7.

Se tomaron 8 muestras por cada plato al que se le midió la rugosidad. A continuación, se muestra la distribución normal que arrojan los resultados.



En la tabla 3 se relacionan las siguientes variables medidas para cada condición de desgaste: presión en el puerto de salida, presión de precarga, caudal y rugosidad.

La condición 1 (95%-90%) corresponde al análisis que se hizo para la bomba con los platos de desgaste nuevos, es semejante a una bomba con pocas horas de uso, se mantiene la presión de precarga constante y en el nivel indicado por el manual de uso de la bomba.

En la condición 2 (90%-85%), la condición 3 (85%-80%), la condición 4 (80%-75%) y la condición 5 (75%-65%), corresponden a desgaste moderado, medio, considerable y alto respectivamente, estas condiciones se obtuvieron con los métodos nombrados anteriormente (rectificado y torneado), con la rugosidad medida se validó la disminución de la eficiencia volumétrica.

La condición 6 (menor a 65%) se obtuvo con unos platos de presión obsoletos en los cuales el caudal de pérdidas era el más alto, además en esta condición tanto la presión de precarga como la de salida no eran constantes, sino que por el contrario disminuían considerablemente en el tiempo en que se tomaba la prueba.

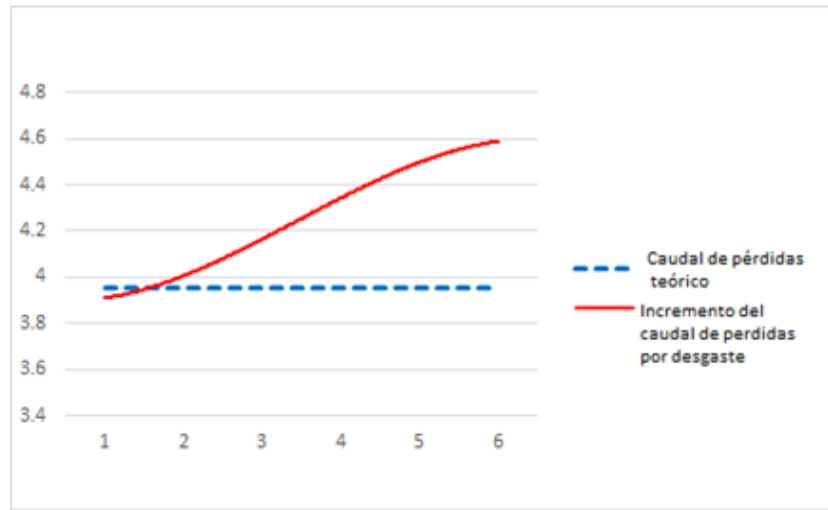
Tabla 3. Condiciones de desgaste

		Condición 1	Condición 2	Condición 3	Condición 4	Condición 5	Condición 6
% eficiencia aproximado		94.90%	90.10%	84.60%	74.80%	69.50%	64.90%
Caudal de pérdidas promedio [gpm]		3.907	4.017	4.144	4.365	4.487	4.590
Presión de Precarga promedio [psi]		251.717	248.626	240.319	130.560	101.272	79.512
Presión de Salida promedio [psi]		716.922	712.422	707.336	529.561	483.522	444.807
Rugosidad Promedio Ra [μm]	Bearing plate	0.29	0.151	1.583	2.031	2.031	2.833
	Valve Plate	0.213	0.448	2.939	0.213	3.246	3.246



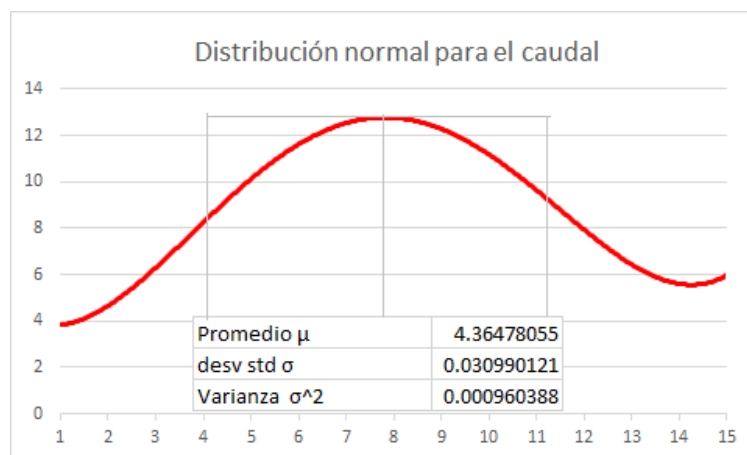
8.2.1 Comportamiento del caudal de pérdidas según el desgaste. Se pudo observar que a medida que aumenta la rugosidad promedio de los platos aumentaba el caudal de pérdidas, debido a que el fluido se escapa entre las micro ralladuras y esto ocasiona que la bomba no tenga la capacidad de sostener la presión interna de precarga ni tampoco la presión de salida.

Figura 48. Aumento de caudal de pérdidas debido al desgaste.



Se validó la eficiencia midiendo el caudal de pérdidas, del cual se tomaron 15 muestras por cada caso y se realizó la correspondiente estadística para corroborar una buena repetitividad de los datos. A continuación, vemos los resultados estadísticos de las muestras de los datos de caudal.

Figura 49. Campana de Gauss para los datos de caudal



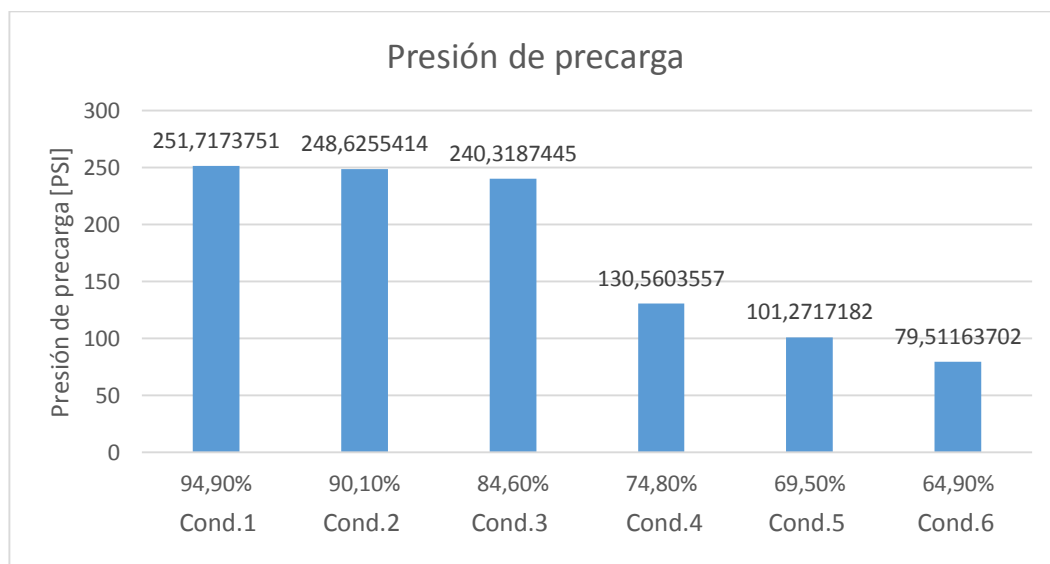
8.2.2 Comportamiento de la presión según el desgaste. La presión de precarga es un indicador directo del estado interno de la bomba, y por consiguiente de los platos rodantes de desgaste.

Para la bomba Eaton 54 que se estudió, este valor está definido en 250 psi, sin embargo, este valor disminuye a medida que el estado de los platos de desgaste también se deteriora.

Si la presión de precarga no logra el valor mínimo estipulado, la válvula de control no es capaz de vencer la presión de los servopistones, el plato basculante no se inclina lo suficiente, por lo tanto, la bomba no entrega caudal que debería porque disminuye el recorrido de los pistones.

A continuación, podemos ver los niveles de presión de precarga para las seis condiciones.

Figura 50. Nivel de Presión de precarga con las 6 condiciones de desgaste



8.4 ANÁLISIS DE LOS ESPECTROS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.

Para llevar los datos captados desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y poder ser analizados con claridad, se llevó a cabo varios procesos que se desarrollaron en MATLAB, los cuales consistían en: se normalizó los datos, se utilizó la ventana Hanning, se promedió los datos tomados, se realizó la FFT y por último se plotearon los datos en 3D.

8.4.1 Especificaciones para el Tratamiento de Datos

8.4.1.1 Normalización de los Datos Para lograr una mejor apreciación y visualización de los datos se realizó una normalización en magnitud en Matlab utilizando la siguiente expresión:

$$y(t) = \frac{r(t)}{|r(t)_{max}|}$$

Entonces se tiene un nuevo vector de datos donde su magnitud ahora se encuentra normalizada. Luego de aplicarle la transformada rápida de Fourier se eleva al cuadrado para poder escalar los máximos más significativos de la señal mientras que los mínimos se atenúan.

8.4.1.2 Ventaneo De La Señal. Se utilizó una ventana Hanning para evitar las discontinuidades de la señal al principio y al final de los datos a analizar.

Se seleccionó esta ventana porque es la más indicada para este estudio. (Ver apartado 2.1.6).

8.4.1.3 Media De Los Datos. Luego de verificar la repetitividad de los datos matemáticamente con la ayuda de Excel se seleccionaron 6 de los 15 datos y se promediaron para darle una mayor robustez al sistema.

8.4.1.4 Transformada Rápida De Fourier (FFT). Como se puede ver en el apartado 2.1.4.4, la FFT se usa como técnica para la detección de fallas, transformando la señal del dominio en el tiempo al dominio de la frecuencia. Es la técnica seleccionada por este proyecto para realizar un mejor análisis.

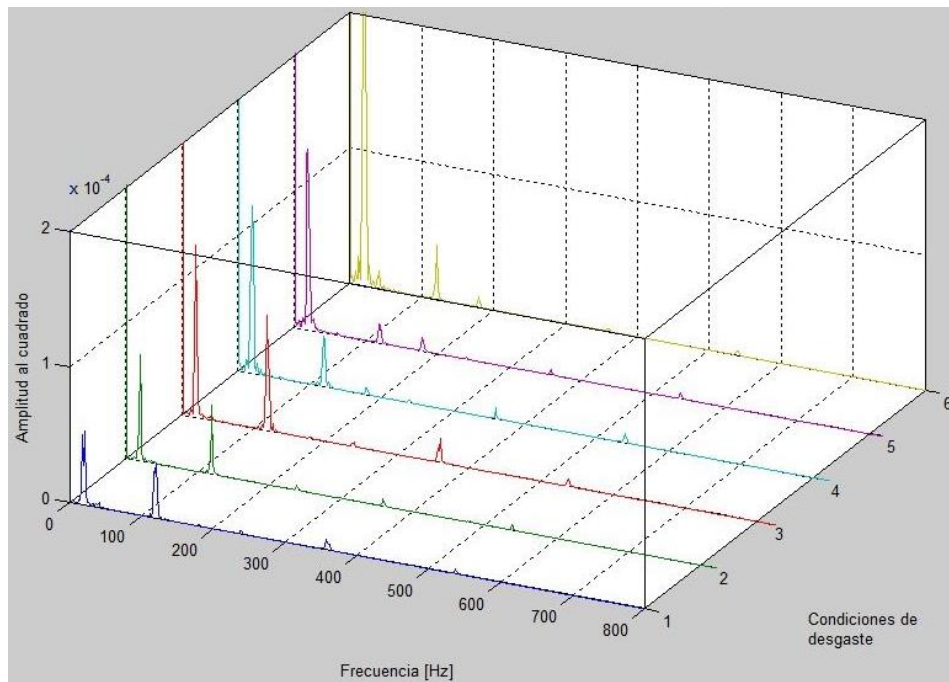
Al vector de datos normalizados, se le aplica el algoritmo de la transformada rápida de Fourier que posee MATLAB para obtener su representación en frecuencia.

8.4.1.5 Función De Ploteo. Para realizar las representaciones gráficas se utilizó la función plot3 incluida por MATLAB en sus librerías, y la cual grafica en tres dimensiones varios espectros luego de construir unas matrices de datos. Se grafica en 3D para apreciar mejor las diferencias entre los espectros de las distintas condiciones de desgaste.

8.4.2 Espectro Presión de Salida. Se quiso analizar los espectros de presión del puerto de salida, para ver qué información se podía extraer referente a las fallas del estudio en cuestión.

Los espectros correspondientes a cada condición de desgaste se muestran a continuación.

Figura 51. Espectros de presión de salida de las condiciones de desgaste

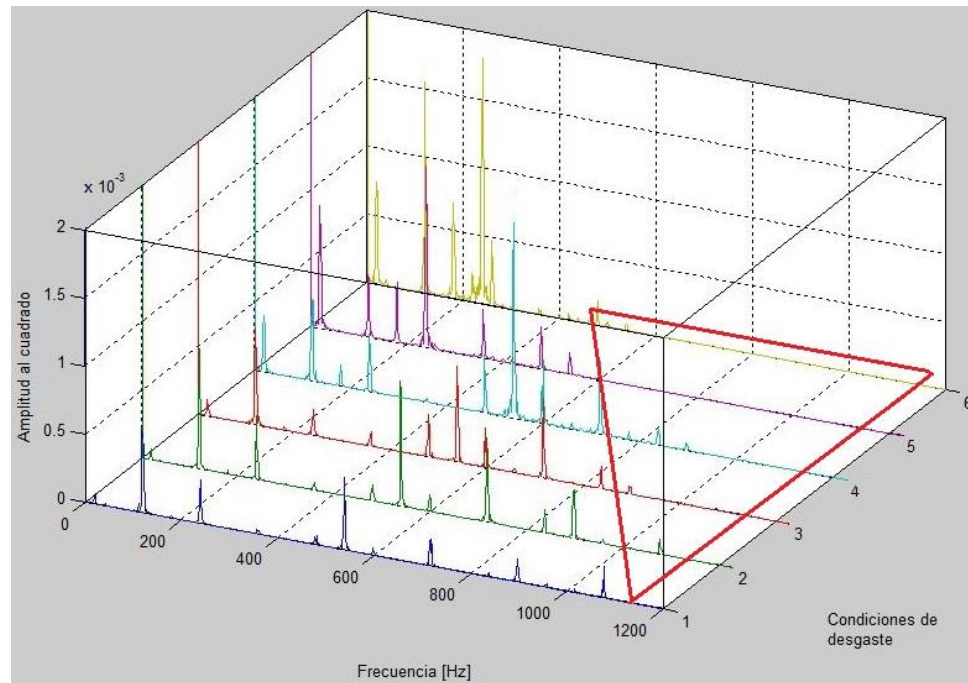


En la anterior gráfica no se puede apreciar una diferencia evidente o indicativo de falla, aunque se incrementa la amplitud del pico 2x no se puede concluir nada de este análisis, por lo tanto, se recurre a los demás análisis. Es probable que no se pueda ver un cambio significativo debido a que el puerto se encuentra lejos de la ubicación de los platos de desgaste.

El espectro de la presión de salida puede estar afectado por la vibración de los demás componentes de la bomba aguas arriba. La información no es muy clara, puede ser porque el sistema está acoplado con todos los demás componentes de la bomba entre los que se encuentran válvulas con resortes del simulador de carga que tienen otra dinámica de segundo orden y esto puede afectar este ítem.

8.4.3 Espectro Presión de Precarga. Del transductor de presión instalado en el puerto de precarga se pudo obtener el siguiente espectro de frecuencia para las diferentes condiciones.

Figura 52. Espectro de presión de precarga para las 6 condiciones.



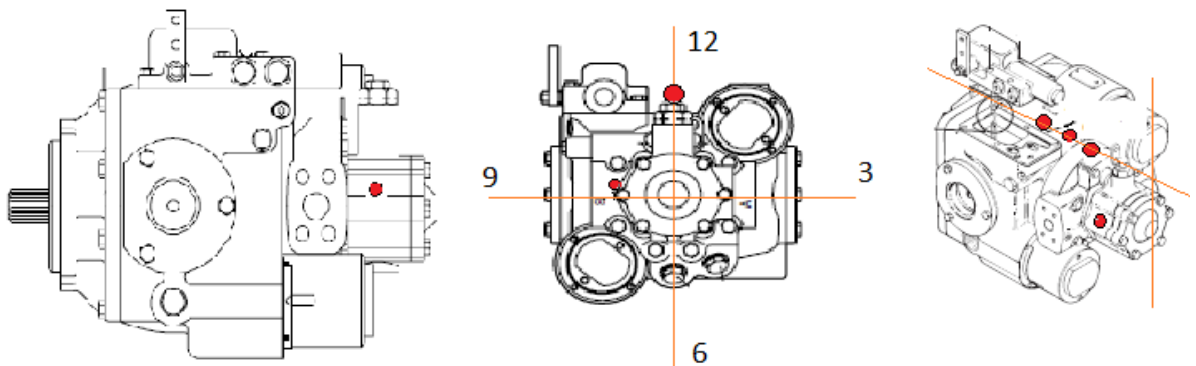
A diferencia del espectro de presión de salida, en este espectro se encontró una evidente atenuación de los picos a frecuencias más altas, a medida que se pronunciaba la falla. Esta atenuación de las magnitudes de los picos de alta frecuencia se debe a que a medida que se presentan más fugas entre los platos, se induce mayor amortiguamiento en el sistema (fenómeno damping). Se puede apreciar un incremento de la amplitud en los picos de baja frecuencia, siendo esto un indicio de falla para bombas.

Al realizar la transformada rápida de Fourier (FFT), se quiso ver algún comportamiento característico del sistema, podemos ver algunos picos en el dominio de la frecuencia, uno a 20 Hz, que corresponde al giro del motor de 1200

RPM, uno a 120 Hz concerniente al movimiento de giro de la bomba de precarga gerotor que tiene 6 lóbulos, uno pequeño a 180 Hz tocante al número de pistones de la bomba, que son 9, y así otros en 240, 360, 480 Hz, armónicos del pico en 120 Hz.

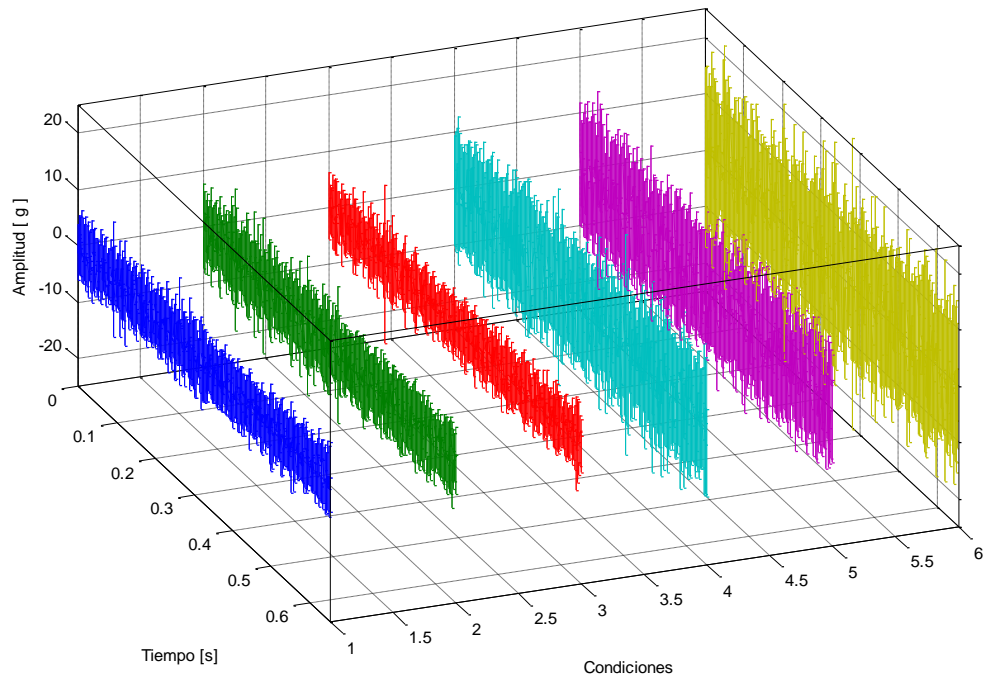
8.4.4 Vibraciones Mecánicas. Las vibraciones mecánicas se captaron en cuatro sitios diferentes en la bomba (ver imagen 53 y 24), sin embargo, después de analizar los datos, el sitio más concluyente para la falla analizada es el punto numero 2 (encima del bearing plate). Los datos de vibraciones de las demás posiciones se pueden usar para otros casos de estudio, por ejemplo, para fallas en la bomba de precarga o fallas en los pistones, tomando como referencia los datos obtenidos para la condición nueva.

Figura 53. Puntos de captación de la vibración



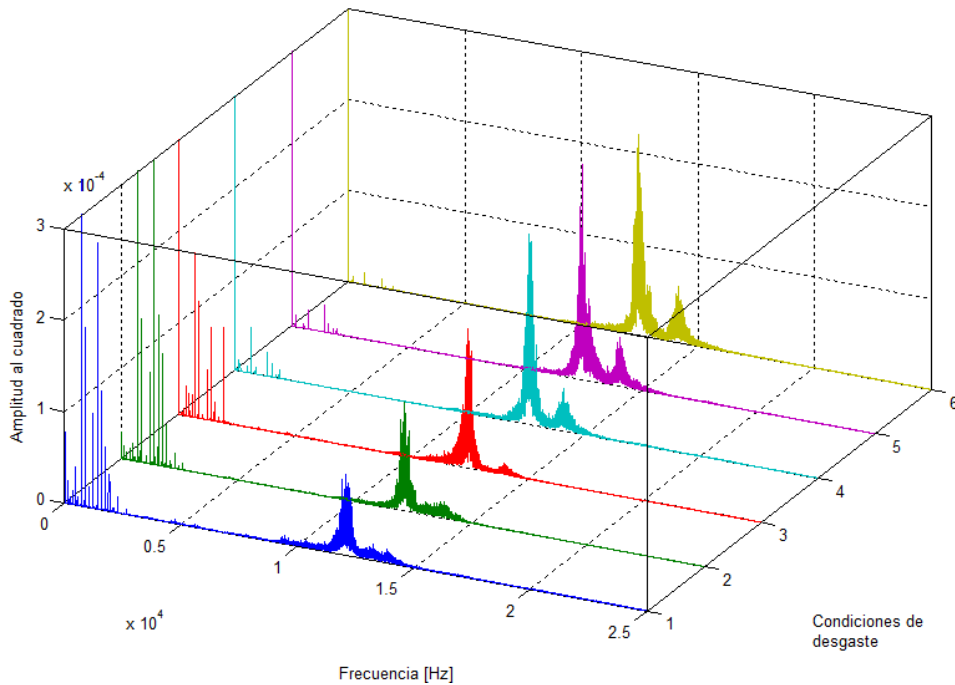
De la señal en el tiempo se puede evidenciar que a medida que el desgaste en los platos aumentaba, la señal se volvía más ruidosa y caótica (figura 53), además se aumentaba la amplitud de las vibraciones, pasaba de un valor promedio aproximado de 8 [g] en amplitud para la condición 1 a casi 20 [g] en la condición 6.

Figura 54. Señales de vibraciones para las seis condiciones



Después de realizar la normalización y los demás pasos del numeral 6.4.1, se obtuvo los siguientes espectros característicos de la falla desgaste en los platos rodantes de presión.

Figura 55. Espectros de vibraciones para las diferentes condiciones de desgaste.

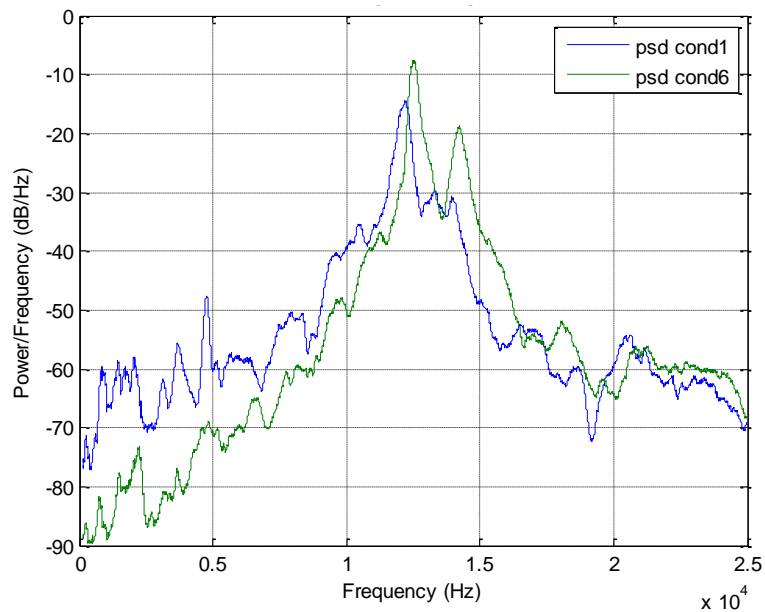


El espectro en el dominio de la frecuencia, se puede observar que a medida que el desgaste se hace mayor en los platos, se evidencia un aumento en la frecuencia como en la amplitud en el conjunto de picos.

También se puede observar un ligero incremento para el valor de la frecuencia a la cual aparece el pico de amplitud, entre la condición 1 y la condición 6 se aprecia un incremento alrededor de 400 Hz.

Adicional a esto se realizó una comparación entre la condición 1 de desgaste y la condición 6, pero aplicando la PSD, que da una idea de la energía contenida en las distintas frecuencias encontradas. A continuación, podemos comparar gráficamente.

Figura 56. Comparación de la PSD para la condición 1 y 6



Como se puede observar la condición 1 tiene más energía contenida a baja frecuencia, mientras en la frecuencia característica que se encuentra aproximadamente en 12000 Hz la condición 6 de desgaste tiene más energía. Como se puede ver en toda esta investigación, la frecuencia de comparación para el desgaste de los platos está situado entre los 12000 y 13000 Hz. Se observa que a medida que aumenta el desgaste aumenta el valor de la frecuencia en la cual se ubica el valor característico.

El aumento de la energía a medida que aumenta el desgaste está relacionado con el aumento de la tolerancia entre los platos de desgaste y esto se debe al aumento de la vibración.

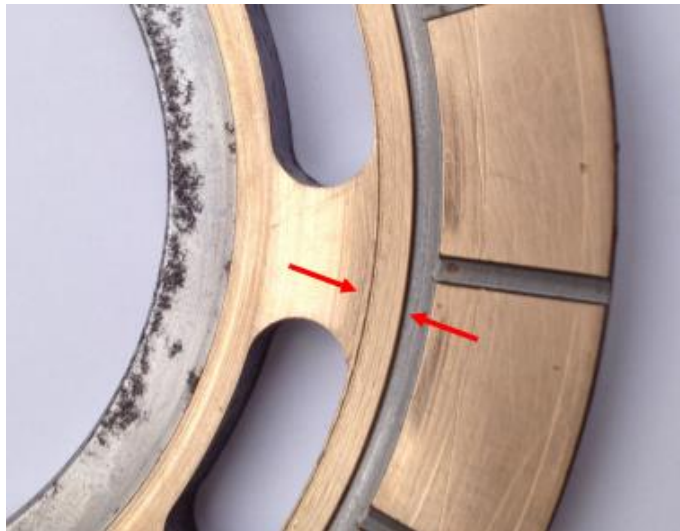
8.5 Análisis de los Resultados

De la toma de datos se evidenció que existe una correlación entre los niveles del caudal de pérdidas, la presión de salida, la presión de precarga, la rugosidad en los

platos y las vibraciones en la bomba con el desgaste de los platos rodantes de presión.

Todas las variables medidas se ven afectadas por el desgaste de los platos de presión, pero de cada una por separado no se puede concluir que existe una falla por desgaste en los platos, por lo tanto, se justifica el análisis integral incluyendo varios indicadores y como medida decisoria las vibraciones mecánicas.

Figura 57. Desgaste en bearing plate



A mayor desgaste (mayor rugosidad) aumenta el caudal de pérdidas, disminuyen las presiones y se generan vibraciones con mayor frecuencia y amplitud.

La disminución de la eficiencia volumétrica está relacionada con el desgaste de los platos de presión. En la imagen anterior podemos ver un plato con desgaste. El desgaste puede ser un canal que se genera debido a fricciones y por donde se escapa el fluido a alta presión.

Entre la condición 3 y la 4, existe un gran salto, tanto en presiones como en vibraciones, esto obedece a que el cambio en la eficiencia volumétrica entre estas dos condiciones es cercano al 10%.

Se pudo observar que un pequeño cambio de rugosidad en la cara de los platos conlleva a una considerable caída en la presión y un aumento del caudal de pérdidas, por esto se concluye que el desgaste en los platos es una falla no menor y de especial atención para una bomba hidráulica de pistones axiales.

9. CONCLUSIONES

- Se realizó una revisión bibliográfica sobre los métodos y técnicas utilizadas en la actualidad para detección y diagnóstico de fallas en sistemas hidráulicos, estudiando las características y aplicaciones de algunos de esos métodos.
- Se diseñó y construyó un sistema para la medición de torque en línea generado por el motor hidráulico, usando una celda de carga con capacidad máxima de una tonelada. El sistema queda funcional y calibrado, además se entrega en software para su uso.
- Se desarrolló un software en LabVIEW que registra los datos para cada uno de las variables medidas en el banco de pruebas: Presión de salida y de precarga, flujo de pérdidas y vibraciones mecánicas, también permite observar el espectro de la frecuencia de cada señal.
- Se realizó una metodología de diagnóstico de fallas para bombas de pistones axiales, donde se caracterizaron 5 condiciones de desgaste en los platos rodantes de presión, analizando todas las variables medidas por el sistema especialmente vibraciones mecánicas.

BIBLIOGRAFÍA

ALBA CASTRO, José Luis. Máquinas de Vectores Soporte (SVM): Curso de doctorado: Decisión, estimación y clasificación. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad de Vigo [Pontevedra, ES,] [citado 18 Dic 2015] Disponible en Internet: <http://web.archive.org/web/20140801145654/http://www.gts.tsc.uvigo.es/~jalba/doctorado/SVM.pdf>

BOLTON William. Mecatrónica. 5ta Edición. Ciudad de México: Alfaomega. 2013.

BORRÁS PINILLA, Carlos. Ingeniería de Mantenimiento. Material docente. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2013.

CUATRECASAS Arbós, Lluís. Gestión del mantenimiento de los equipos productivos. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2012.

EL-BETAR Ahemd, *et al.* Fault Diagnosis of a Hydraulic Power System Using an Artificial Neural Network. Cairo: Ain Shams University, 2006.

GARCÍA, Alfonso. Análisis de vibraciones. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 1992.

GUTIERREZ, Laura y CORRALES, Carlos. Diseño de un freno Prony para la medición de potencia. Tesis de grado Ingeniero Mecánico. Medellín: EAFIT, Departamento de Ingeniería Mecánica, Área de Diseño. 2008.

HAST, Daniel and ROLFFNDEISEN, StefanStreif. Detection and isolation of parametric faults in hydraulic pumps using a set-based approach and quantitative–qualitative fault specifications. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, Automation Engineering, Helmholtzplatz. 2014. [cited: 14 Nov 2015] Available from: ELSEVIER

HE, Qing-hua, HE, Xiang-yu and ZHU, Jian-xin. Fault detection of excavator’s hydraulic system based on dynamic principal component analysis. Changsha: School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, 2008. [cited: 15 Nov 2015] Available from: Springer.

HELWIG Nikolai, *et al.* Identification and quantification of hydraulic system faults based on multivariate statistics using spectral vibration features. Procedia Engineering. [online] 2015 vol n° [cited: 24 dic 2015] Available from: ELSEVIER

HU, Xiaoming. The Fault Diagnosis of Hydraulic Pump Based on the Data Fusion of D-S Evidence Theory. Huaiyin: Institute of Technology, Huaian, 2012. [cited: 18 Nov 2015] Available from: ResearchGate.

ISERMANN Rolf. Fault-diagnosys systems. Berlin. Springer. 2006.

LI, Sheng *et al.* Hydraulic System Faults Diagnosis Based on Multi-class Support Vector Machine. Shijiazhuang: International Conference on Digital Manufacturing & Automation. Digital Manufacturing and Automation (ICDMA), 2010 International Conference on Vol:1 Ordnance Engineering College Shijiazhuang, 2010. [cited: 19 Nov 2015] Available from: IEEE Xplore.

LI, Zeliang. Condition Monitoring of Axial Piston Pump. Master's Thesis. Saskatoon: University of Saskatchewan, department of Mechanical Engineering, 2005.

MANRING, Noah. Fluid Power Pumps&Motors: Analysis, design and control. MC Graw Hill, University of Missouri, Columbia. 2013.

MORA GUTIÉRREZ, Luis Alberto. Mantenimiento: Planeación ejecución y control. México: Alfaomega grupo editor. 2009. Pág. 408 ProQuest.

NATIONAL INSTRUMENTS ¿Qué es Adquisición de Datos?. Disponible en internet: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

NIÑO Arnulfo. Rediseño y construcción de un banco de pruebas para diagnóstico de fallas en una Hidrotransmisión bomba variable – motor fijo. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2015.

PATTERSON-HINE, Aaseng *et al.* Review of Diagnostic Techniques for ISHM Applications, NASA Ames Research Center Honeywell Defense & Space Electronics Systems, Napa, CA; vol. 1, 2005.

RAZAVI Behnam. Condition Monitoring in a Hydraulic System of an Industrial Machine using Unscented Kalman Filter. Master's Thesis. Saskatoon: University of Saskatchewan, department of Mechanical Engineering, 2007.

ZACHRISON, Anderson. Fluid Power Applications Using Self-Organising Maps in Condition Monitoring. Linköping: Linköping University, Division of Fluid and Mechanical Engineering Systems, Department of Management and Engineering 2008.