

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención de título de:  
INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA  
DESARROLLO DE UNA BALANCEADORA ELECTRÓNICA PARA  
ROTORES DE MOTORES ELÉCTRICOS PARA LA EMPRESA  
SIPROELECTRIK S.A**

**AUTORES**

**FRANK ALEXANDER CÁRDENAS IÑIGUEZ  
EDISON PAÚL COLLAGUAZO TASIPANTA**

**TUTOR  
HAMILTON LEONARDO NÚÑEZ VERDEZOTO**

**Quito, agosto del 2019**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Nosotros, Frank Alexander Cárdenas Iñiguez, con documento de identificación N° 172623393-3 y Edison Paúl Collaguazo Tasipanta, con documento de identificación N° 172594312-8 , manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “DESARROLLO DE UNA BALANCEADORA ELECTRÓNICA PARA ROTORES DE MOTORES ELÉCTRICOS PARA LA EMPRESA SIPROELECTRIK S.A”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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



Frank Alexander Cárdenas Iñiguez  
C.I: 1726233693-3




Edison Paúl Collaguazo Tasipanta  
C.I: 172594312-8

Quito, agosto 2019

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “DESARROLLO DE UNA BALANCEADORA ELECTRÓNICA PARA ROTORES DE MOTORES ELÉCTRICOS PARA LA EMPRESA SIPROELECTRIK S.A” realizado por, Frank Alexander Cárdenas Iñiguez y Edison Paúl Collaguazo Tasipanta, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, agosto 2019



Ing. Hamilton Leonardo Núñez Verdezoto  
C.I: 1712981487

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a las personas más importantes de mi vida, mis padres, que estuvieron apoyándome y guiándome durante todo mi proceso de formación y que han sido un apoyo fundamental ya que me han guiado por el camino de la rectitud y la humildad. Sin su perseverancia y sus ganas de verme superarme a mí mismo no hubiese cumplido una de las metas más importantes en la vida de cualquier ser humano. Los amo con todo mi corazón.

Frank Cárdenas Iñiguez.

El presente trabajo está dedicado a mi familia y especialmente a mis padres que han sido el soporte fundamental a lo largo de mi formación como profesional dándome como ejemplo la perseverancia y lucha recordándome que cada sacrificio tiene su recompensa y es gracias a ellos que mis metas y aspiraciones se han cumplido.

Edison Collaguazo Tasipanta.

## **AGRADECIMIENTOS**

En el camino de la vida, siempre te encuentras con personas que cambian tu manera de apreciar la vida y el mundo. Esas personas han sido mis maestros durante todo el proceso de formación, ya que me enseñaron el valor del trabajo duro y del esfuerzo y mis compañeros de cotidianidad, con los cuales día a día podía aprender algo diferente de ellos enriqueciéndome y ayudándome a crecer profesional y personalmente. Lo más hermosos de estudiar una carrera de ciencias exactas, es la exploración y la manera de cómo esta te enseña a percibir el mundo que nos rodea, por lo que quiero agradecer a mis padres por alentar mis ganas por descubrir y crear.

Frank Cárdenas Iñiguez

La vida es hermosa, ya que podemos compartir con personas que tienen diferentes formas de pensamiento las cuales nos pueden ayudar y guiar en problemas que se puede presentar. Por eso quiero resaltar ese apoyo incondicional de todos mis compañeros de clase que estuvieron de alguna u otra manera de la misma forma quiero agradecer a todos los maestros que inculcaron el conocimiento en cada hora de clase, dándome las bases necesarias como es el razonamiento y la investigación para realizar el trabajo de titulación.

Edison Collaguazo Tasipanta

## ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE.....	v
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	xiii
CAPITULO 1 ANTECEDENTES.....	1
1.1    Planeamiento del problema.....	1
1.2    Justificación.....	1
1.3    Objetivos.....	2
1.3.1    Objetivo General.....	2
1.3.2    Objetivo específicos.....	2
CAPÍTULO 2 MARCO CONCEPTUAL.....	3
2.1    La empresa SIPROELECTRIK S.A.....	3
2.2    Introducción al fenómeno de vibraciones.....	3
2.3    Medición de vibración mecánica.....	4
2.3.1    Transductor.....	5
2.3.2    Acondicionamiento.....	5
2.3.3    Sistema.....	6
2.3.4    Excitador.....	7
2.4    El desbalance de los rotores.....	7
2.4.1    Unidades y métodos para expresar el desbalance.....	8
2.4.2    Balanceo en un plano.....	8
2.4.3    Balanceo en dos planos.....	9
2.5    Tipos de rotores.....	11
2.5.1    Rotor de jaula de ardilla simple.....	12
2.5.2    Rotor de jaula de ardilla doble.....	12
2.5.3    Rotor de anillos rozantes.....	12
2.5.4    Rotor de ranura profunda.....	13
2.6    Viabilidad.....	14
2.6.1    Aplicación 1.....	14

2.6.2	Aplicación 2 .....	15
2.6.3	Aplicación 3 .....	15
CAPÍTULO 3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN .....		17
3.1	Descripción y construcción del hardware .....	17
3.1.1	Base mayor .....	18
3.1.2	Bases Vertical Posterior .....	19
3.1.3	Bases Vertical Anterior .....	20
3.1.4	Bases Flotantes .....	21
3.1.5	Mecanismo de sujeción de la polea .....	23
3.1.6	Motor Eléctrico .....	25
3.2	Implementación de la etapa de potencia .....	26
3.2.1	Variador de frecuencia .....	27
3.2.2	Sistema de Encendido .....	28
3.3	Diseño e implementación del hardware de adquisición de datos .....	30
3.3.1	Diseño del tacómetro digital .....	30
3.3.2	Diseño e Implementación de la tarjeta de adquisición de señales .....	32
3.4	Procesamiento de la señal de aceleración .....	33
3.4.1	Lectura de las señales mediante el protocolo I2C .....	33
3.4.2	Calibración del acelerómetro .....	35
3.4.3	Ventana de discriminación .....	36
3.4.4	Diseño del filtro de media móvil .....	37
3.4.5	Determinación de la velocidad y posición del desbalance .....	40
3.5	Implementación del HMI .....	44
CAPÍTULO 4 PRUEBAS Y RESULTADOS .....		49
4.1	Preparación de la máquina .....	49
4.2	Preparación de la tarjeta de adquisición de datos .....	50
4.3	Procedimiento del proceso de balanceo .....	52
4.4	Ejemplo de aplicación 1 .....	52
3.1.7	Ensayo con un rotor jaula de ardilla de 10 Hp de baja velocidad .....	52
3.1.8	Resultados .....	54
4.5	Ejemplo de aplicación 2 .....	55
4.5.1	Ensayo con un rotor jaula de ardilla de 75 Hp de alta velocidad .....	55
4.5.2	Resultados .....	57
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		58

5.1	Conclusiones .....	58
5.2	Recomendaciones.....	59
	REFERENCIAS.....	60
	ANEXOS.....	62



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de un sistema general de medición de vibraciones .....	5
Figura 2.2 Funciones del preamplificador .....	6
Figura 2.3 Equilibradora horizontal de la marca ERBESSD INSTRUMENTS .....	6
Figura 2.4 Señalización para el balanceo de un rotor sin medición de fase.....	9
Figura 2.5 Planos de balanceo y puntos de medición .....	10
Figura 2.6 Representación Vectorial del efecto cruzado .....	11
Figura 2.7 Rotor jaula de ardilla de ranura simple .....	12
Figura 2.8 Rotor jaula de ardilla de ranura doble .....	12
Figura 2.9 Rotor bobinado de anillos rozantes.....	13
Figura 2.10 Rotor jaula de ardilla de ranura profunda.....	13
Figura 2.11 Máquina balanceadora para rotores de hasta 500 KG.....	14
Figura 2.12 Sistema portátil de adquisición de datos .....	15
Figura 2.13 Banco de pruebas de balanceo dinámico.....	16
Figura 3.1 Plano de la base mayor de balanceadora en cm (vista frontal).....	19
Figura 3.2 Plano de la base posterior en cm (vista frontal e isométrica) .....	20
Figura 3.3 Plano de la base posterior en cm (vista frontal e isométrica) .....	21
Figura 3.4 Plano de las bases flotantes en cm (vistamos frontal lateral e isométrico) .....	22
Figura 3.5 Plano Base móvil de sujeción en cm (vistamos frontal e isométrico).... (Collaguazo Edison, 2019).....	23 24
Figura 3.6 Plano Rodamientos en cm (vistamos frontal y lateral) .....	24
Figura 3.7 Motor eléctrico con rodamiento de transmisión en el eje .....	25
Figura 3.8 Estructura completa de la máquina balanceadora de rotores eléctricos ....	26
Figura 3.9 Tablero de mando para motor eléctrico.....	26
Figura 3.10 Diagrama de conexiones del variador de frecuencia Powtran.....	27
Figura 3.11 Diagrama de mando simulado en el software fluidsim de Festo .....	29
Figura 3.12 Tablero de control (vista frontal) .....	29
Figura 3.13 Circuito esquemático simulado en Proteus para implementar el tacómetro digital.....	32
Figura 3.14 PCB para la tarjeta de adquisición de datos .....	32
Figura 3.15 Esquema de comunicación del protocolo I2C .....	33
Figura 3.16 Comunicación del sensor MPU6050 mediante I2C .....	34
Figura 3.17 Aceleración obtenida por la interfaz I2C de Arduino .....	35

Figura 3.18 Función de calibración .....	36
Figura 3.19 Eliminación de la señal indeseable .....	36
Figura 3.20 Respuesta al impulso para un filtro sin media simétrica en $mm/s^2$ .....	37
Figura 3.21 Respuesta al impulso para un filtro con media simétrica .....	38
Figura 3.22 Señal adquirida (verde) vs señal filtrada (roja).....	39
Figura 3.23 Señal de velocidad obtenida por integración .....	40
Figura 3.24 Espectro de la señal de velocidad .....	41
Figura 3.25 función implementada para el cálculo del desbalance total .....	41
Figura 3.26 función implementada para el ángulo de corrección .....	42
Figura 3.27 Diagrama polar.....	42
Figura 3.28 Masa de corrección sobre los alabes físicos del rotor. ....	43
Figura 3.29 Pantalla de bienvenida.....	44
Figura 3.30 Registro de datos del motor .....	45
Figura 3.31 Adquisición de señales de los sensores .....	46
Figura 3.32 Etapa de análisis de las señales .....	47
Figura 4.1 Ajuste de las bases a las dimensiones del rotor .....	49
Figura 4.2 Nivelación de las bases flotantes. ....	49
Figura 4.3 Sujeción del rotor y ubicación de los sensores. ....	50
Figura 4.4: Selección del tipo de plataforma utilizada .....	51
Figura 4.5: Selección del puerto COM .....	51
Figura 4.6: Rotor de 10hp señalizado en sentido horario.....	53
Figura 4.7 Resultados de las corridas de prueba sobre rotor de 10 hp .....	53
Figura 4.8 Diagrama polar obtenido del análisis .....	54
Figura 4.9 Resultados de las masas de corrección sobre los alabes 2 y 3.....	54
Figura 4.10 Resultados de amplitud del rotor balanceado .....	55
Figura 4.11: Rotor de 75 hp señalizado en sentido horario.....	55
Figura 4.12: Resultados de las corridas de prueba sobre rotor de 75 hp .....	56
Figura 4.13 Diagrama polar obtenido del análisis .....	56
Figura 4.14 masas de corrección sobre los alabes 2 y 3 .....	57
Figura 4.15 Resultados de amplitud del rotor balanceado .....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Modelos para balanceo por tipos de rotores. ....	7
Tabla 3.1 Tabla de correlación para aceros estructurales .....	17
Tabla 3.2. Descripción de la base Mayor .....	19
Tabla 3.3. Descripción de la base Mayor .....	20
Tabla 3.4. Descripción de la base Mayor .....	21
Tabla 3.5. Descripción Bases flotantes .....	22
Tabla 3.6. Descripción Base móvil de sujeción .....	24
Tabla 3.7. Descripción rodamientos .....	24
Tabla 3.8. Características Motor Trifásico .....	25
Tabla 3.9. Características del variador de frecuencia Powtran modelo PI130.....	27
Tabla 3.10. Tabla de configuración para el variador Powtran .....	28
Tabla 3.11 descripción de la tarjeta de adquisición de datos .....	33
Tabla 3.12. Descripción de la interfaz de bienvenida.....	44
Tabla 3.13. Descripción del registro de datos de la empresa .....	45
Tabla 3.14. Descripción del registro de datos de placa del motor.....	45
Tabla 3.15. Descripción de la interfaz de adquisición de señales de los sensores .....	46
Tabla 3.16. Descripción de la interfaz de análisis de las señales .....	47
Tabla 3.16. Descripción de la interfaz de análisis de las señales (continuación) .....	47

## **RESUMEN**

Un problema importante que se producen en los motores y generadores eléctricos es la vibración excesiva, lo que causa daños significativos que afectan gravemente tanto los componentes mecánicos y en menor medida la parte eléctrica, reduciendo significativamente la vida útil de cualquier máquina giratoria. Aproximadamente el 40 % de estos excesos de vibraciones se debe a una avería en el rotor, que pudo ser originada por una sobrecarga, golpes constantes entre otras posibles causas. Por esta razón, en la empresa Siproelectrik S.A fue implementada una balanceadora electrónica, la cual es capaz de soportar un peso de hasta 2 T (toneladas) permitiendo así analizar vibraciones en rotores de gran potencia. Dicha balanceadora es capaz de ajustarse a cualquier tipo de tamaño de rotor, ya que consta de múltiples partes móviles, además de contar con puntos de sujeción específicos donde se coloca los sensores, siendo estos un acelerómetro piezoeléctrico y un tacómetro digital que permiten obtener las señales de vibración y velocidad respectivamente. El método para analizar el punto de corrección se conoce como cuatro corridas sin fase y consiste en colocar unos contrapesos en puntos específicos del rotor lo que ocasiona diferentes valores de vibración y mediante el uso de ecuaciones matemáticas se determina el punto exacto de compensación logrando así reducir el exceso de vibraciones, consiguiendo un giro uniforme, lo que permitirá el buen funcionamiento de la maquina giratoria una vez montada y puesta en marcha.

## **ABSTRACT**

An important problem that occurred in the electric motors and generators it's the excessive vibrations, what it causes several damages that affect the mechanical and electrical components reducing like this useful life to any rotary machine. Proximately the 40% of these vibrations that occurred due a fault in the rotor, originated to an overload, constant blows r other wises. To this reason in the Siproelectrik S.A factory was build an electric balancer, which support a weight near to the 2T (tons), allowing analyze the electric rotor's vibrations in the powerful machines. This balancer has the possibility to adjust to some kind of rotor's form what it has different moving parts and different specific points of subjection where the sensors are placed; there are piezoelectric accelerometer and digital tachometer. The method to determine the point of correction it's known like four runs without phase and consist to put weights in specific points to rotor that generate different amplitude values and with the use to mathematics resources select the exactly compensation point, reducing these exes to vibrations and achieving a uniform turn giving a good performance to the rotary machine assembled and commissioning.

## INTRODUCCIÓN

El trabajo de titulación presente consta de cinco capítulos, los cuales detallan el proceso a seguir para la construcción de una máquina balanceadora industrial de gran precisión para el análisis de las vibraciones y obtener valores medibles que permita corregir el desbalance de los rotores eléctricos.

En el primer capítulo trata el problema de estudio, así como la justificación y los objetivos que guiarán esta investigación, para la realización de un maquina balanceadora eficiente.

El segundo capítulo brinda el preámbulo teórico dando una concepción de las diferentes técnicas y tipos de desbalances que una maquina giratoria puede presentar, así como las herramientas que se han implementado hasta la actualidad para determinar y corregir estos desbalances, Este preámbulo lo tomamos como punto de partida para la implementación tanto de un hardware como de un software que ayude a determinar dichos puntos de desbalanceo.

Con la información obtenida en el preámbulo teórico, el capítulo tres detalla el método seguido para implementar una estructura que sea capaz de albergar un rotor y las condiciones mecánicas para que dicha estructura no se vea afectada por el peso del mismo, la implementación de un tablero de control que impulsara la máquina, así como la tarjeta de adquisición de datos la cual toma las señales físicas producidas por el rotor desbalanceado, mediante el uso de herramientas informáticas de vanguardia.

Finalmente, en el cuarto capítulo se ejecutan las pruebas necesarias sobre rotores eléctricos de diferentes tamaños y formas para comprobar el buen funcionamiento tanto del hardware y software de la balanceadora electrónica.

# **CAPITULO 1**

## **ANTECEDENTES**

### **1.1 Planeamiento del problema**

En la empresa Siproelectrik S.A la tarea de balanceo se la realiza de manera prácticamente manual y debido a esto, los tiempos para completar esta tarea son muy altos, además que la calidad de balanceo no siempre resulta con la precisión que se requiere y esto a la larga representa un problema de deterioro mayor de las partes mecánicas en las máquinas eléctricas como daños en los rodamientos, deterioro de escudos e incluso el rotor como tal.

El proceso empieza con dos operarios montando el rotor eléctrico en una estructura la cual simula el funcionamiento del motor eléctrico, posteriormente con la ayuda de pesas van muy lentamente desplazándola a lo ancho del rotor hasta observar donde cae más el peso, por tanto, ese se considera el punto en donde hay un mayor desequilibramiento. Dado que es un proceso prácticamente manual esto nos lleva al planteamiento de la interrogante. ¿Se puede desarrollar una balanceadora electrónica eficiente de rotores de motores eléctricos para la empresa Siproelectrik S.A?

### **1.2 Justificación**

La necesidad de corregir los efectos de la vibración en máquinas giratorias ha sido un problema que a persistido durante décadas, hasta que en el año de 1870 nace de la mano de Henry Martinson la primera máquina balanceadora. La importancia de balancear equipos giratorios cada vez es inminente razón por la cual se han ido perfeccionando nuevas técnicas para este cometido. Sin embargo, no fue hasta el año de 1907 cuando se implementa la primera máquina balanceadora de dos planos, diseñada por Lawaczek, que posteriormente es modificada y construida por C. Schenck con el fin de utilizarse en aplicaciones industriales.

El trabajo de balanceo de forma manual de rotores puede llegar a ser muy extenso y muchas veces no se logra el resultado que se espera. Además de ser un trabajo con un alto grado de incertidumbre ya que la calidad del balanceo dependerá mucho del criterio y de la experiencia de los operarios que estén realizando dicho trabajo. Un

sistema automático por lo contrario realizaría el balanceo de una manera más rápida y eficaz logrando así reducir el tiempo del balanceo total del rotor y la incertidumbre de la calidad del balanceo como tal. Por tanto, una máquina de esta naturaleza mejoraría este proceso de una manera muy significativa reduciendo el número de operarios, ya que esta tarea la podría realizar sin problema una sola persona, además de reducir tiempos y prevenir de mejor manera los fallos que se pueden producir en la máquinas a largo plazo, lo que ayudará también a ofrecer un servicio de mantenimiento correctivo por parte de la empresa

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Desarrollar una balanceadora electrónica implementando tecnología de vanguardia para el análisis y corrección de vibraciones producidas en rotores de motores eléctricos

#### **1.3.2 Objetivo específicos**

- Investigar los principales elementos que intervendrán en la implementación de la máquina mediante el estudio de sus componentes más importantes para la elaboración de planos estructurales.
- Construir una estructura metálica utilizando materiales resistentes la cual servirá de soporte para el análisis de vibraciones.
- Desarrollar un circuito de control mediante componentes electrónicos programables para la obtención de señales debidamente acondicionadas.
- Diseñar una interfaz de usuario (HMI), utilizando herramientas informáticas especializadas para el control de todas las funciones de la máquina.
- Realizar pruebas de funcionamiento comparando rotores balanceados manualmente y con la máquina automatizada para la obtención de índices de productividad.



## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO CONCEPTUAL**

#### **2.1 La empresa SIPROELECTRIK S.A**

La empresa SIPROELECTRIK S.A ubicada en las calles Benalcázar y Cornelia de Polit, en el barrio la Armenia sector San Rafael, valle de los Chillos es una empresa de servicios la cual se encarga de realizar mantenimiento preventivo, reparaciones y rediseños de máquinas eléctricas en general. La empresa cuenta con tres departamentos principales, los cuales son:

- Departamento de Finanzas y Contabilidad.
- Departamento de Gerencia.
- Departamento de Mantenimiento.

Todos los departamentos en conjunto hacen de Siproelectrik S.A una empresa rentable y de gran fiabilidad, brindando un servicio de calidad a todo el país cumpliendo los más altos estándares a nivel industrial.

#### **2.2 Introducción al fenómeno de vibraciones**

Dentro de lo que cabe mencionar de una vibración, esta puede ser definida como la oscilación o el movimiento repetitivo a lo largo de una posición de equilibrio. Esta vibración entonces se interpreta como un movimiento oscilatorio simple o un movimiento armónico simple propiamente dicho, el cual para el caso de estudio particular será un movimiento oscilatorio en dos dimensiones (plano x e y) (White, 2010). Al considerar a la posición de equilibrio de la vibración como el origen de un sistema armónico simple, esta describirá en si un movimiento ondulatorio de naturaleza sinusoidal, entonces se genera un movimiento, el cual cuenta con una amplitud y se desliza a lo largo del tiempo, descrito por la ecuación 2.1.

$$y = A\sin(\omega t) \qquad \text{Ec. (2.1)}$$

Dónde: A: amplitud de fase

$\omega$ : frecuencia angular

t: tiempo

De la cual, derivando con respecto al tiempo se obtiene sus componentes de velocidad y de aceleración de la siguiente manera:

$$v = \frac{dy}{dt} = A\omega \cos(\omega t) \quad \text{Ec.(2.2)}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \sin(\omega t) \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Estas componentes de velocidad y aceleración respectivamente, serán conocidas como sus componentes instantáneas. A nivel práctico estas componentes pueden ser analizadas mediante sensores que capten la vibración (acelerómetros) y mediante el uso de técnicas de acondicionamiento electrónico capaces de integrar una señal, se puede obtener señales de velocidad y posición respectivamente.

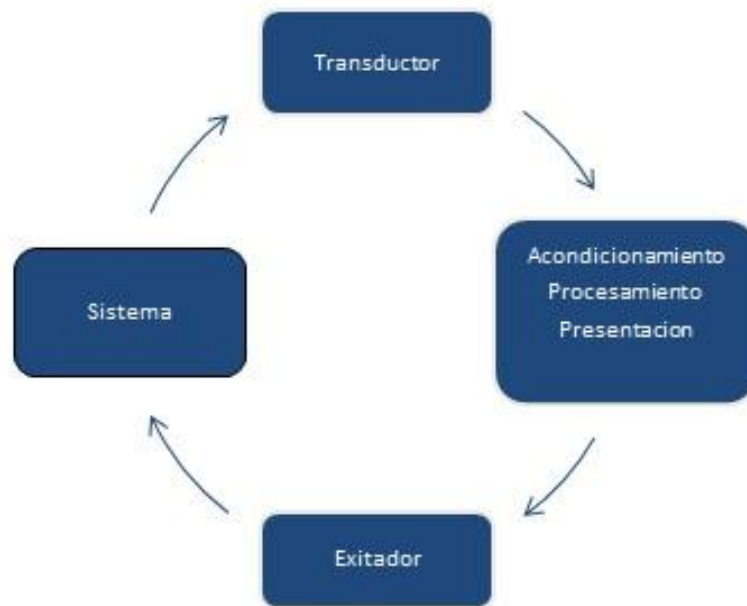
Existen dos tipos de vibración las cuales se pueden clasificar como:

- Una vibración armónica periódica la cual será constante y presenta un comportamiento ideal por llamarlo de alguna manera, la cual será de fácil predicción.
- Vibraciones aleatorias las cuales presentan un patrón consistente pero constituido por un infinito de componentes armónicas. Se presentan de manera errática y tiene contenido de frecuencia en toda la banda de frecuencia. (Marín, 1997)

### **2.3 Medición de vibración mecánica**

El sistema de medición es el encargado de obtener las señales físicas mediante el uso de un transductor adecuado, procesar esta información mediante software y proporcionan datos entendibles para generar un resultado. Dichas acciones se pueden interpretar de dos formas, como variables de estado las cuales pueden ser manipuladas y perturbaciones sobre las cuales no se puede tener ningún tipo de control alguno (Brotons, 2004) . En un sistema de este tipo, existen 4 elementos fundamentales que permiten generar un ambiente similar al de una máquina eléctrica ya operando. Dichos elementos se muestran en la Figura 2.1.

Figura 2.1 Diagrama de un sistema general de medición de vibraciones



Proceso de medición de la vibración (Cardenas Frank & Collaguazo Edison, 2019)

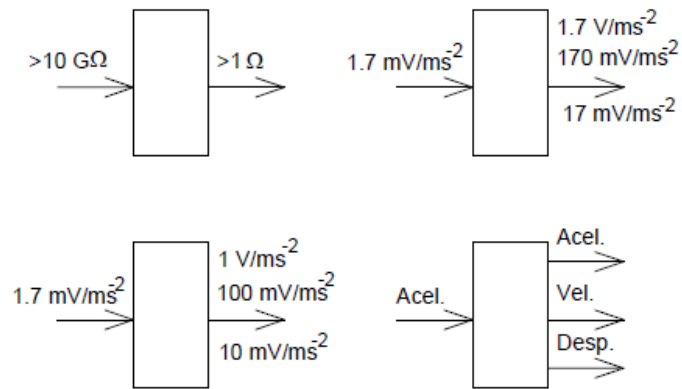
### 2.3.1 Transductor

El transductor ideal para adquirir las señales vibraciones en una máquina rotatoria es el acelerómetro piezoeléctrico. El cual produce una variación de tensión por efecto de la deformación de la fuerza, por lo que su sensibilidad disminuye bajo efectos del incremento de su frecuencia de resonancia, lo que permite que el dispositivo produce una señal proporcionalmente variable a la vibración adquirida.

### 2.3.2 Acondicionamiento

Al comparar la calidad de medición obtenida en equipos modernos, su valor oscila en el rango de los 20mV y en mediciones donde las vibraciones se cuantifican en valores muy altos de impedancia llegando a valores sobre los Giga Ohmios, por lo que la corriente tiende a ser prácticamente nula, por este fenómeno es recomendable colocar un amplificador integrador el cual permite además obtener valores de velocidad y desplazamiento al integrar la señal de aceleración antes mencionada. En la Figura 2.2 se tiene un esquema de la función del preamplificador integrador

Figura 2.2 Funciones del preamplificador



Procesamiento de la señal de vibración (White, 2010)

La señal es captada por el sensor, debidamente acondicionada y así está lista para usarse. Por tanto, en este punto se implementaría la interfaz hombre-máquina o también conocida como HMI y aquí es donde se haría todo el control de la máquina en si para el análisis y de vibración de los diferentes tipos de máquinas rotatorias.

### 2.3.3 Sistema

La máquina que se pretende implementar en este trabajo es lo que se conoce como máquina de balanceo horizontal denominadas HL mostrada en la Figura 2.3, las cuales sirven para el balanceo de cigüeñales, rotores de motores eléctricos, cilindros de máquina ventiladores e incluso turbinas y alteradores.

Figura 2.3 Equilibradora horizontal de la marca ERBESSD INSTRUMENTS



Máquina balanceadora horizontal para rotores de hasta (ERBESSD INSTRUMENTS, 2019)

### 2.3.4 Excitador

El excitador para mover dichas máquinas rotativas será un motor de inducción comandado por un variador de frecuencia, que mediante una polea este genera un movimiento rotativo el cual crea un ambiente de trabajo de operación de la máquina analizada. La potencia del motor eléctrico dependerá de las dimensiones de la máquina balanceadora.

### 2.4 El desbalance de los rotores

Una de las principales causas, las cuales abarcan casi el 40 % de vibraciones excesivas en máquinas eléctricas de debe al desbalanceo que se producen en máquinas rotativas. Dicho desbalanceo se produce por factores externos como exceso de carga en el rotor, mala condición de rodamientos, deterioro mecánico del rotor en sí, entre algunos otros factores físicos.

Hay que tomar en cuenta la forma del rotor como tal, dicha forma viene dado por un factor que constituye a la relación de L/D, donde L es la longitud del rotor, pero solo su parte efectiva, es decir el área donde el campo magnético influye directamente y D es el diámetro máximo del rotor en sí. En la tabla 2.1 se aprecia las condiciones de balanceo ya sea en uno o dos planos.

Tabla 2.1. Modelos para balanceo por tipos de rotores.

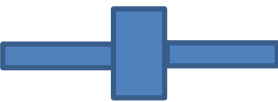


Rotor \ Modelo	Relación $\frac{L}{D}$	Modelos de balanceo		
		Un plano (rpm)	Dos planos (rpm)	Varios planos
	Menor que 0,5	Hasta 1200	Mayor a 1000	No
	Entre 0,5 y 2	Hasta 1500	Superior al 70% de su Vel. Critica	Superior al 70% de su Vel. critica
	Mayor de 2	Hasta 1000	Hasta el 70% de su Vel. critica	Superior al 70% de su Vel. critica

Tabla de los tipos de rotores a balancearse (Cardenas Frank & Collaguazo Edison, 2019)

### 2.4.1 Unidades y métodos para expresar el desbalance

Para asociar los efectos del desbalance, se dice que una masa de prueba  $m_d$  puede estar a una distancia  $r$  y de igual manera un rotor se consigue el mismo efecto colocando una masa  $M$  excéntrica (fuera del centro) denominada  $e$ . Por tanto, se asume que el efecto del desbalance es igual en cualquier instancia, obteniendo así la siguiente ecuación.

$$m_d \times r = M \times e \quad \text{Ec.(2.4)}$$

De manera que el producto de  $m_d \times r$  se lo denomina cantidad de desbalance, expresado según la norma ISO 1940 como:

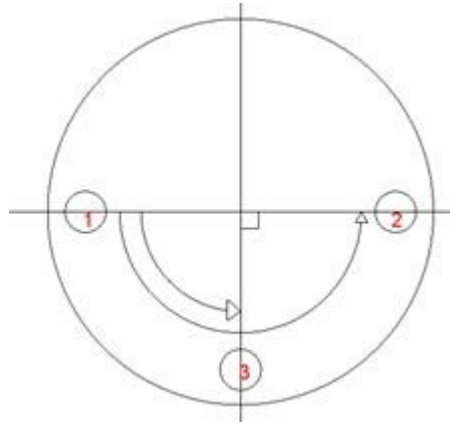
$$U_d = m_d \times r \quad \text{Ec. (2.5)}$$

El método el cual se emplea para realizarse las pruebas de desbalance de los rotores eléctricos se conoce como Balanceo sin medición de fase, ya que no interesa saber la fase del rotor o incluso en algunos casos es imposible saber dicho dato. Este método se lo puede aplicar tanto un plano (o cara) del rotor, así como en dos planos del mismo. Siempre es aconsejable realizar la prueba en dos planos debido a que estas pruebas se realizan a velocidades considerables notando de mejor manera el efecto del desbalance en un motor ya trabajando a plena carga.

### 2.4.2 Balanceo en un plano

Para la medición en un plano, el método consiste en tomar 3 mediciones de prueba, la primera de ellas se hace con el rotor sin masa de prueba o la llamada lectura original  $V_0$ . Para la segunda corrida, se toma una masa conocida de cualquier valor arbitrario (masa en gramos) y se coloca en la posición uno como se indica en la Figura 2.4, a esta se la denomina como  $M_T$ , tomando el dato de amplitud de las vibraciones ahora la llamada  $V_1$ . Posteriormente la masa de pruebas  $M_T$  será recorrida a la posición 2 conservando el radio de fijación y nuevamente se toma la amplitud de las vibraciones ahora denominada como  $V_2$ .

Figura 2.4 Señalización para el balanceo de un rotor sin medición de fase



Metodo de medicion de cuatro corridas sin fase (Collaguazo Edison, 2019)

Del resultado único de la masa de prueba se puede obtener el efecto de dicha masa denominada  $V_T$  así como el ángulo indicador del punto de desbalance respecto a la posición 1, se presentan de la siguiente manera.

$$V_T = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 - 2V_0^2}{2}} \quad \text{Ec. (2.6)}$$

$$\alpha_0 = \cos^{-1} \frac{V_1^2 - V_2^2}{4V_T V_0} \quad \text{Ec. (2.7)}$$

$$M_c = M_T \frac{V_0}{V_T}$$

Ahora solo queda por saber en qué posición se deberá correr con respecto del desbalance original, representado por  $V_0$  para ello se ejecuta una cuarta corrida desplazando la masa de pruebas  $M_T$  desde el punto 2 hacia el punto 3 según la nueva lectura  $V_3$  se en qué sentido se debe recorrer el ángulo de corrección, si es en sentido horario o anti horario con respecto a la posición 1. La masa de corrección puede calcularse a partir de la ecuación 2.7

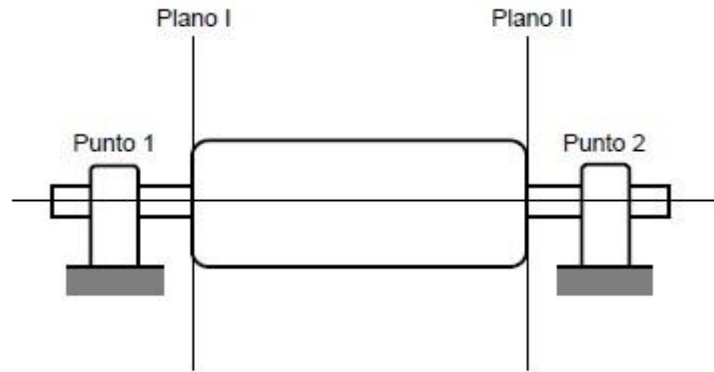
$$M_c = M_T \frac{V_0}{V_T} \quad \text{Ec. (2.8)}$$

### 2.4.3 Balanceo en dos planos

Para balancear un rotor en dos planos, hay que prestar especial énfasis al estudio del denominado “Efecto cruzado”, el cual no es más que la influencia o interferencia

mutua que tiene un plano de corrección respecto al otro. El procedimiento es similar al balanceo en un plano, pero es necesario seguir una serie de consideraciones. En la Figura 2.5 se muestra el esquema de la representación de los planos de balanceo en un rotor cilíndrico.

Figura 2.5 Planos de balanceo y puntos de medición



Esquema de la representación de los diferentes planos en rotores eléctricos (White, 2010)

- Se mide los niveles de vibración en los puntos 1 y 2, obteniendo las lecturas originales.
- Con el rotor detenido, se fija una masa de pruebas  $M_T$  en el plano 1 y se toma el valor de vibración por acción simultánea de la masa de prueba en el plano 1.
- Se repite el procedimiento para el plano 2, colocando la masa de pruebas al mismo nivel que en el plano 1, es decir manteniendo el mismo nivel de referencia que el utilizado para el plano 1 y se toma los niveles de vibración.

Esto representaría una solución de tipo vectorial, la cual se puede determinar tanto gráficamente como analíticamente. El problema entonces es analizar la interferencia que produce la masa de prueba de un plano respecto al otro. El efecto es posible determinar mediante vectores de posicionamiento como se muestra en la Figura 2.6.

$V_{1,1} - V_{1,0}$  : Medición en el plano uno con la masa de pruebas situada en el plano 1

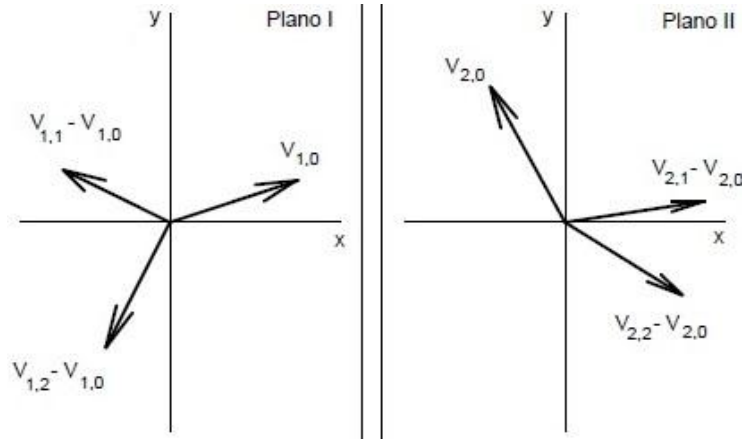
$V_{1,2} - V_{1,0}$  : Medición en el plano uno con la masa de pruebas situada en el plano 2

$V_{2,1} - V_{2,0}$  : Medición en el plano dos con la masa de pruebas situada en el plano 1

$V_{2,2} - V_{2,0}$  : Medición en el plano dos con la masa de pruebas situada en el plano 2



Figura 2.6 Representación Vectorial del efecto cruzado



Esquema vectorial del método de medición a dos planos (Marín, 1997)

El análisis vectorial vendría dado de la siguiente manera:

$$(V_{1,1} - V_{1,0})\vec{Q}_1 + (V_{1,2} - V_{1,0})\vec{Q}_2 = -V_{1,0} \quad \text{Ec. (2.9)}$$

$$(V_{2,1} - V_{2,0})\vec{Q}_1 + (V_{2,2} - V_{2,0})\vec{Q}_2 = -V_{2,0} \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Siendo  $Q_1$  y  $Q_2$  los vectores de alterar y desviar la posición de los vectores de posicionamiento con el fin de compensar el desbalance original, lógicamente estos vectores tendrán su módulo así como su fase, y se los puede expresar como:

$$\vec{Q}_1 = Q_1 \angle \alpha_{Q_1} \quad \text{Ec. (2.11)}$$

$$\vec{Q}_2 = Q_2 \angle \alpha_{Q_2} \quad \text{Ec. (2.12)}$$

Para el cálculo de las masas de corrección  $M_c$  para cada plano, estas vendrán por:

$$M_{c_1} = Q_1 \times M_T \quad \text{Ec. (2.13)}$$

$$M_{c_2} = Q_2 \times M_T \quad \text{Ec. (2.14)}$$

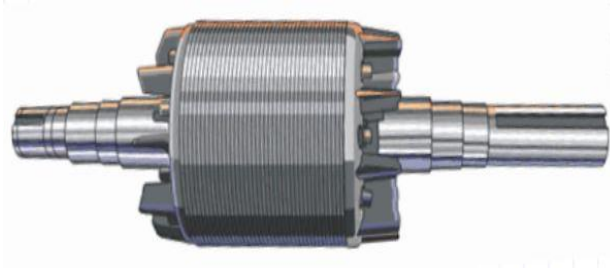
## 2.5 Tipos de rotores

En la industria la mayoría de motores y generadores los cuales accionan y operan los diferentes tipos de máquinas, son motores de corriente alterna los que siempre se encuentra en cualquier tipo de fábrica, pero casos muy especiales es necesario disponer de algún motor de corriente directa. Entre los tipos de rotores más usuales que se tiene en la industria se dispone.

### 2.5.1 Rotor de jaula de ardilla simple

Es un tipo de rotor macizo descrito en la Figura 2.7 el cual cuenta con ranuras por las cuales pasan barras conductoras de aluminio o cobre con surcos y conectados juntos en los dos extremos, poniendo en cortocircuito los anillos que forman la jaula. Presenta una corriente de arranque de 6 a 8 veces su corriente nominal.

Figura 2.7 Rotor jaula de ardilla de ranura simple

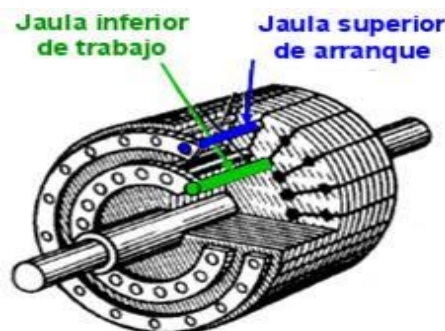


Vista lateral de un rotor jaula de ardilla (Rosales Fernandez , 2012)

### 2.5.2 Rotor de jaula de ardilla doble

La ranura por la que atraviesa las barras conductoras es doble, de allí su nombre estas ranuras están separadas internamente por eso a simple vista no se puede apreciar, como se muestra en la Figura 2.8. la ventaja que presenta este tipo de rotor es que su intensidad de arranque es solo de 3 o 5 veces la intensidad nominal razón por la cual es más usado en la actualidad

Figura 2.8 Rotor jaula de ardilla de ranura doble



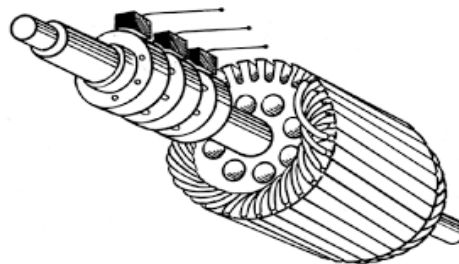
Modelo esquemático de un rotor de jaula de ardilla doble (Robles Aguilar, 2011)

### 2.5.3 Rotor de anillos rozantes

Se denomina de anillos rozantes por su disposición de anillos conectados directamente en el eje del rotor, como se muestra en la Figura 2.9. Las fases del

bobinado se acoplan exteriormente mediante carbones de grafito o también llamados escobillas que rozan con los anillos. Conectando unas resistencias externas a las escobillas se consigue aumentar la resistencia rotórica y dependen de dichas resistencias se puede alcanzar del 150 % al 250 % del par normal al arranque consiguiendo una intensidad de arranque no mayor a 2 veces la intensidad nominal del motor. Cabe mencionar que ciertos fabricantes realizan motores los cuales no son cilíndricos como en la mayor parte de casos, sino son de tipo cónico distintivo de ciertas marcas como DEMAG O MUNCK por nombrar algunas.

Figura 2.9 Rotor bobinado de anillos rozantes



Esquema de un rotor de anillos rozantes de corriente alterna (De Valdevira , 2011)

#### 2.5.4 Rotor de ranura profunda

Similar al rotor jaula de ardilla simple, pero con una variante en su ranurado el cual es más profundo como se muestra en la Figura 2.10, consiguiendo así una menor corriente de arranque (4 veces mayor a la nominal). Este tipo de motores se emplean en aplicaciones de baja que necesiten realizar paros y arranques continuos todo el tiempo.

Figura 2.10 Rotor jaula de ardilla de ranura profunda



Esquema de un rotor de ranura profunda (Robles Aguilar, 2011)

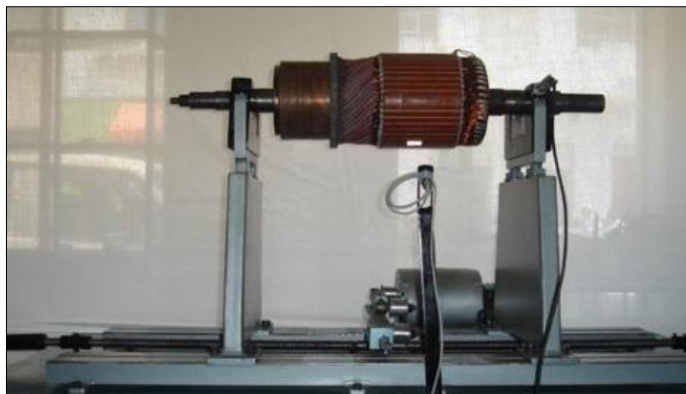
## 2.6 Viabilidad

Este tipo de máquinas resultan muy importantes en el sector industrial ya que han ayudado por décadas a realizar un mantenimiento preventivo a máquinas eléctricas giratorias. Esto ha evitado que las empresas que trabajan con motores de más de 100 HP y generadores mayores de 100 KVA sufran daños irreparables, lo que representaría para las empresas pérdidas económicas significativas. Para la fabricación de la balanceadora dinámica expuesta en este proyecto, se ha tomado como punto de partida algunos proyectos previos de estudiantes e investigadores, así como modelos de balanceadoras comerciales manufacturadas por firmas tan importantes como ERBESDD INSTRUMENTS o VIBRANCHECK. A nivel comercial se producen insumos para el análisis de vibraciones, pero únicamente las herramientas y el software necesario para realizar esta tarea más no el banco de pruebas. Por esta razón las empresas que brindan este servicio, necesariamente tendrán que construir un banco de pruebas y las correcciones para el balanceo dinámico.

### 2.6.1 Aplicación 1

En el año 2009, en la ciudad de Latacunga - Ecuador se desarrolló una balanceadora controlada por computador la cual fue realizada por Marco Cadera y Erick Chancusig, de la carrera de electromecánica de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPEL). En la Figura 2.11 se puede ver la máquina ya montada con un rotor de prueba lista para operar. (Cadena Padilla & Chancusig Pila, 2009)

Figura 2.11 Máquina balanceadora para rotores de hasta 500 KG



Maquina balanceadora horizontal elaborada por estudiantes ESPE Latacunga (Cadena Padilla & Chancusig Pila, 2009)

La estructura de esta máquina cuenta con dos soportes en los cuales se sientan las piezas a balancear, con la ayuda de unos rodamientos se crean unos cojinetes para que el rotor pueda girar libremente y evitando que el rozamiento sea el mínimo entre sí. Una vez el rotor empiece a girar a la velocidad nominal, se monitorean las vibraciones y se obtienen los resultados en base al peso de corrección y el ángulo de donde se sitúa dicho peso. Adicionalmente cuenta con su software de análisis el cual fue creado con la ayuda de la DAQ USB-9243 e implementado en el software de Labview.

### 2.6.2 Aplicación 2

La revista chilena de ingeniería *Ingeniare* publicó en el año 2006 un artículo a cargo de Edgar Estupiñan, Cesar San Martin y Luis Canales, el cual hace mención de la creación de una máquina balanceadora la cual es capaz de hacer el balanceo en dos planos y en un plano. En este trabajo se implementa únicamente el instrumento virtual para el balanceo dinámico de rotores, pero más no el banco de pruebas basado en un sistema de adquisición de datos (SAD). En la Figura 2.12 se puede ver la implementación final la cual fue realizada en el software de Labview. (Estupiñan, San Martin, & Canales , 2006)

Figura 2.12 Sistema portátil de adquisición de datos



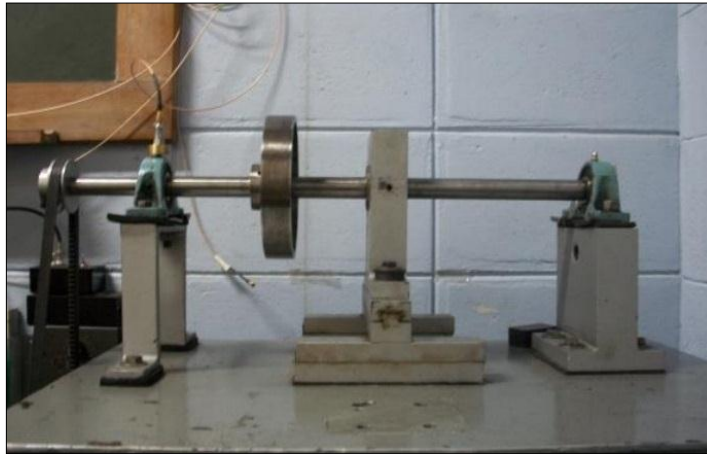
Sistema adquirente de datos de vibraciones mecánicas (Estupiñan, San Martin, & Canales , 2006)

### 2.6.3 Aplicación 3

En una publicación de la revista colombiana de tecnologías avanzadas publicada en junio de 2018, se muestra el trabajo realizado por John Lizazo, Andrés Puentes y Mary Vergara, donde diseñan un sistema de adquisición de datos para el desbalance

en máquinas rotativas. La implementación de este sistema está más orientado al uso en un laboratorio de pruebas el cual reposa en la universidad de los andes Venezuela, por lo que el equipo para realizar el balanceo dinámico siempre está montado de tal manera que permanece anclado al banco de pruebas como se puede apreciar en la Figura 2.13. El sistema a diferencia de los 2 ejemplos anteriores cuenta con un diseño, el cual fue elaborado cada dispositivo de manera artesanal y no utilizando tarjetas de adquisición de datos comerciales. El software utilizado para implementar esta herramienta es Labview y mediante la tarjeta INVIBRA. (Lizazo, Puentes, & Vergara Ph.D, 2018)

Figura 2.13 Banco de pruebas de balanceo dinámico



Analizador experimental de vibraciones para rotores (Lizazo, Puentes, & Vergara Ph.D, 2018)

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

#### 3.1 Descripción y construcción del hardware

La máquina consta de múltiples partes mecánicas móviles, siendo su principal cometido crear un ambiente que recree el comportamiento de una máquina rotatoria en funcionamiento. Por tanto, para el diseño hay que considerar una estructura que sea capaz de resistir un peso aproximado de 2T (toneladas) y ajustarse a diferentes distancias tanto en el plano X como en el plano Z, para que el rotor se ubique adecuadamente y de esta manera realizar un análisis de vibraciones lo más preciso posible.

La construcción de esta estructura se encuentra realizada en acero tipo ASTM A 500 que es un tipo de aleación entre hierro y carbono el cual contiene un porcentaje de carbono del 15 %, siendo capaz este de deformarse en pequeña cantidad, pero al mismo tiempo de resistir una gran cantidad de peso dependiendo del espesor de la estructura. En la Tabla 3.1 se aprecia los tipos de acero que existen en el mercado y que fueron seleccionados para construcción de las partes de la estructura mecánica.

Tabla 3.1 Tabla de correlación para aceros estructurales

CORRELACION DE LAS NMX Y ASTM DE ACEROS ESTRUCTURALES					
Nomenclatura		F <sub>y</sub> <sup>(5)</sup>		F <sub>u</sub> <sup>(6)</sup>	
NMX (1)	ASTM (2)	MPa	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa	Kg/cm <sup>2</sup>
B-254	A 36	250	2,530	400 a 550	4,080 a 5,620
	A 529	345	3,515	485	4,950
		380	3,880	485	4,950
		320	3,235	460	4,710
B-282	A 242	345	3,515	485	4,920
		290	2,950	414	4,220
		345	3,515	450	4,570
B-284	A 572	414	4,220	515	5,270
		450	4,570	550	5,620
	A 992	345	3,515	450 a 620	4,570 a 6,330
B-177	A 53	240	2,460	414	4,220
B-199	A 500 <sup>(5)</sup>	320	3,235	430	4,360
B-200	A 501	250	2,530	400	4,080
	A 588 <sup>(6)</sup>	345	3,515	483	4,920
		250	2,550	400	4,080
		345	3,515	450	4,590
		485	4,950	585	5,965
		690	7,036	585	7,750
		620	6,322	690	7,040
	A 913 <sup>(7)</sup>	345 a 483	3,515 a 4,920	448 a 620	4,570 a 6,330

Tabla de descripción de los tipos de aceros industriales en el mercado (Gerdau Corsa, 2018)

Para analizar la máxima resistencia al peso que tendría la máquina, se tiene que partir del hecho de que sea capaz de soportar hasta 2T de carga. Se sabe que el peso de cualquier objeto siempre se concentra en el centro del mismo, es decir allí se encuentra su centro de masa idealmente, por tanto, la sumatoria de momentos quedará como la sumatoria de fuerzas para cada punto de sujeción colocado en los extremos del rotor a analizarse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \sum \tau &= 0 & \sum Fy &= 0 \\ R_{by}(D) - 2 \text{ ton} \left( \frac{D}{2} \right) &= 0 & R_{by} + R_{ay} - 2 \text{ ton} &= 0 \\ R_{by} &= \frac{2 \text{ ton } D}{2 D} & R_{ay} &= -R_{by} + 2 \text{ ton} \\ R_{by} &= 1 \text{ ton} & R_{ay} &= -1 \text{ ton} + 2 \text{ ton} \\ & & R_{ay} &= 1 \text{ ton} \end{aligned}$$

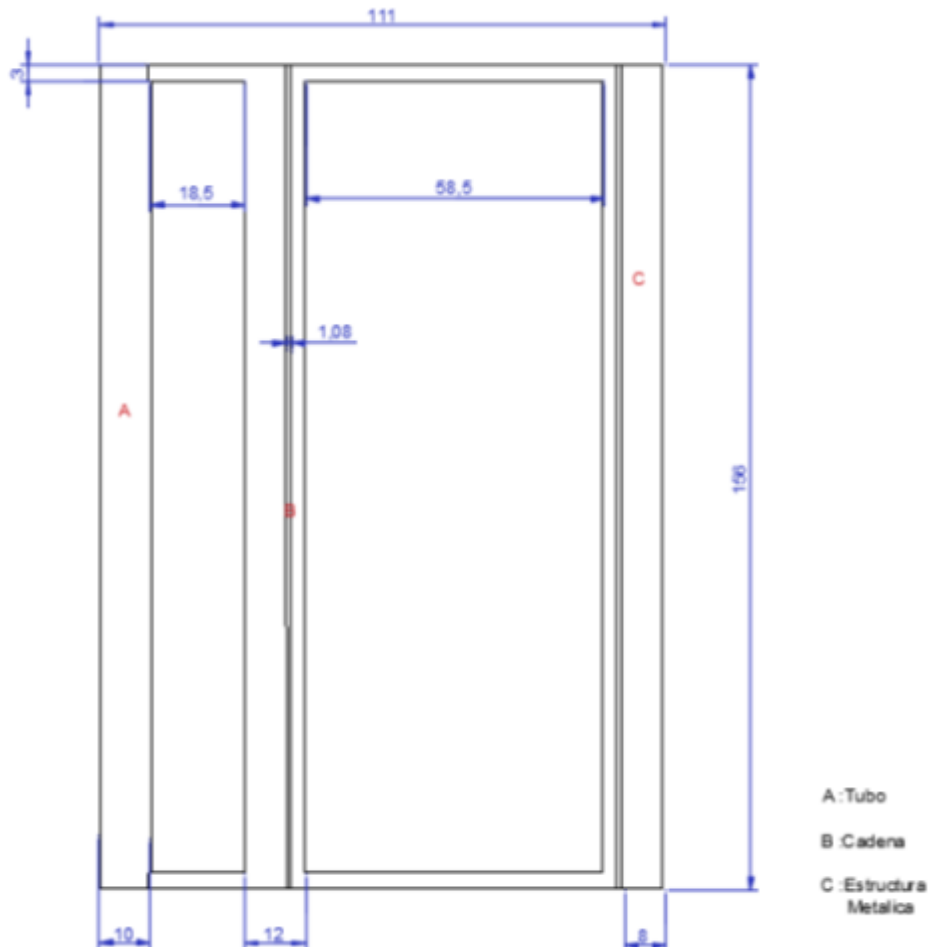
En efecto la cantidad de peso que debe soportar cada una de las bases es de al menos 1T (tonelada). Es necesario tener en cuenta la forma de cada una de las bases tanto la parte delantera como la parte posterior. Una de las formas más adecuadas para lograr distribuir el peso del rotor de mejor manera es implementar una armadura de tipo trapezoidal, debido a su inclinación la fuerza no recae sobre uno de los ejes, sino que se distribuye uniformemente en los dos planos consiguiendo que la carga resultante sea menor. (Orozco, 2013)

### 3.1.1 Base mayor

Base sobre la cual reposa todos los componentes de la máquina. Cuenta con una cadena en cada lateral de la base, por la que se desplazan los dos soportes verticales, los cuales sostienen al rotor a analizarse. Además, cuenta con un tubo en el cual se desplaza el motor eléctrico que genera el movimiento del rotor a analizarse. En la Figura 3.2 se observa el plano a mayor detalle, cuyas medidas están expresadas en centímetros (cm) y en la Tabla 3.1 se da una breve descripción de los materiales.



Figura 3.1 Plano de la base mayor de balanceadora en cm (vista frontal)



Plano realizado en el software Autocad (Cárdenas Frank , 2019)

Tabla 3.2. Descripción de la base Mayor

Sección	Material	Descripción
A	Acero	Tubo hueco de 10 cm de diámetro externo y 8 cm de diámetro interno
B	Cobre y Aluminio	Cadena de motocicleta usada como transmisión
C	Acero	estructura maciza de 4 cm de espesor que sostiene todas las partes de la estructura

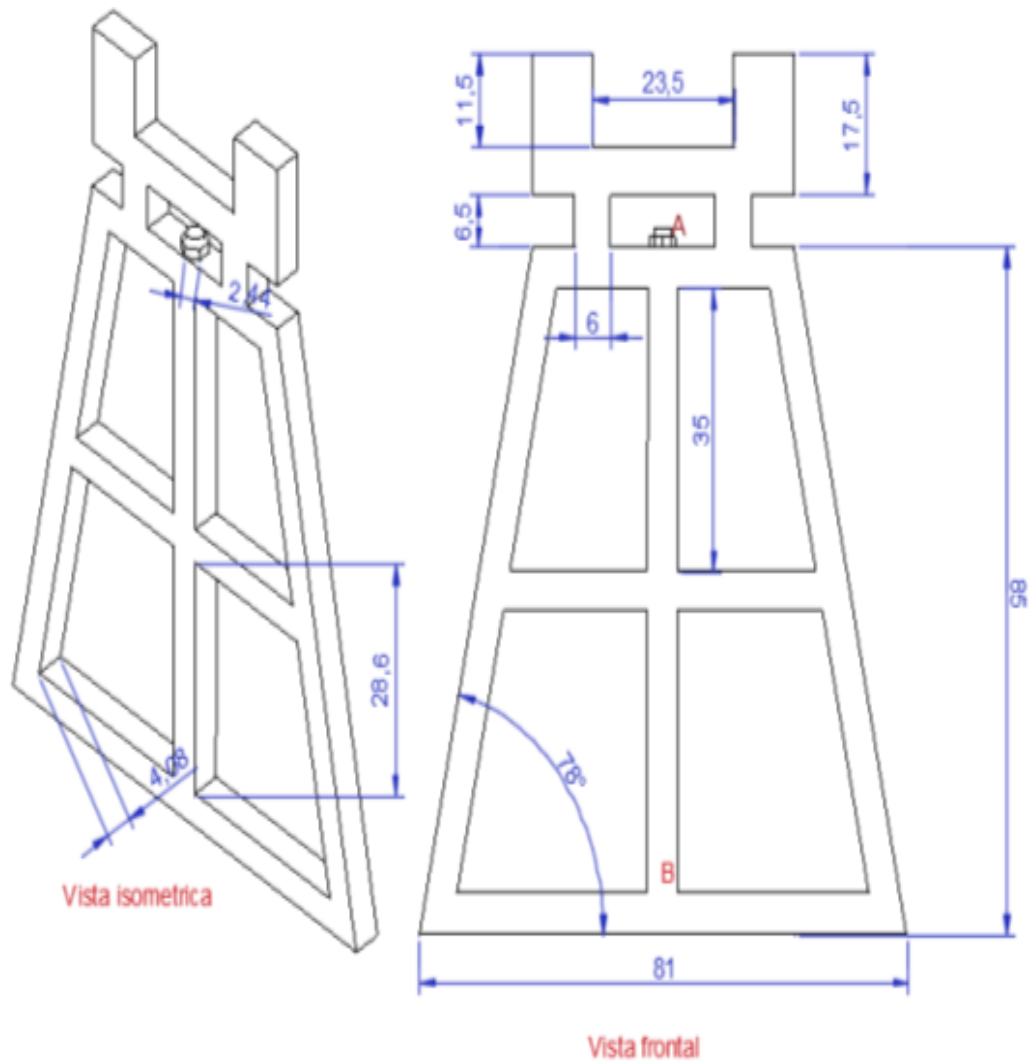
(Collaguazo Edison, 2019)

### 3.1.2 Bases Vertical Posterior

Bases de forma trapezoidal sobre las cuales se sostienen las bases flotantes que a su vez alojan al rotor por su lado posterior. Cuentan en cada extremo de su base un engranaje el cual se encaja en la cadena y mediante una transmisión manual se puede regular la distancia respecto a la base anterior hasta que se ajusten al tamaño del rotor

a analizarse. En la Figura 3.2 se visualiza la estructura cuyas medidas son cm, así como en la Tabla 3.3 la descripción de los materiales utilizados

Figura 3.2 Plano de la base posterior en cm (vista frontal e isométrica)



Plano realizado en el software AutoCAD (Cárdenas Frank , 2019)

Tabla 3.3. Descripción de la base Mayor

Sección	Material	Descripción
A	Acero	Tuerca que atraviesa la máquina para ser ajustada a la mase mayor
B	Acero	Estructura metálica que sostiene la base flotante y el peso del rotor

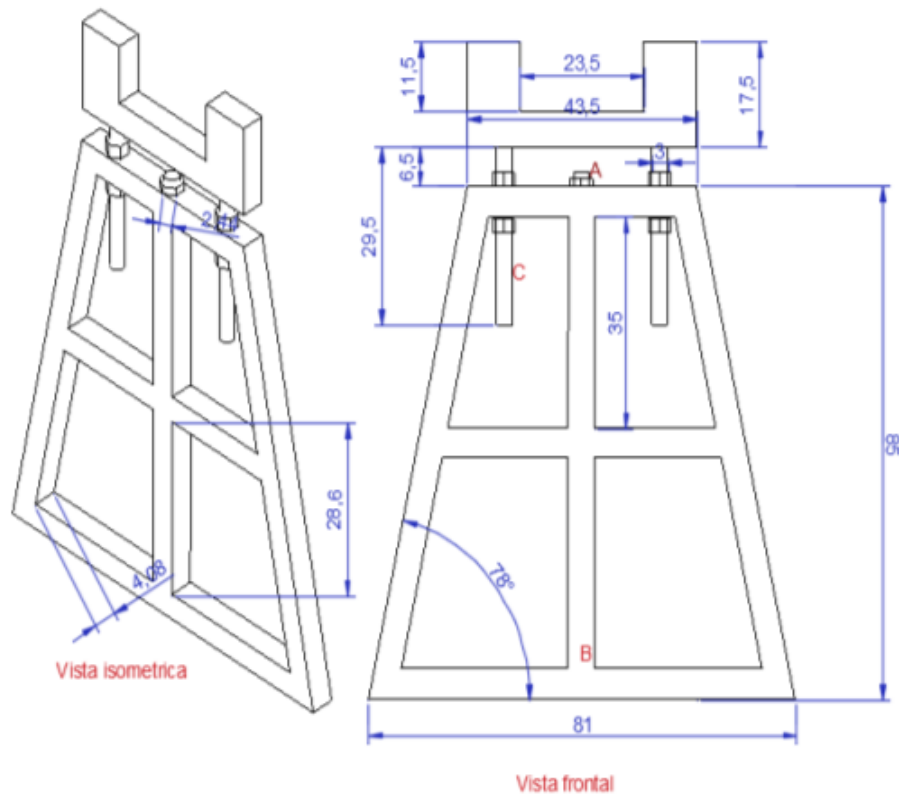
(Collaguazo Edison, 2019)

### 3.1.3 Bases Vertical Anterior

Base de forma trapezoidal en la cual que se aloja la parte frontal del rotor a analizarse. Cuenta con las mismas características de la base posterior con la

diferencia que esta posee 2 tuercas en cada extremo que permite ajustar la altura de la base flotante que reposa sobre esta base permitiéndose así ajustarse de mejor manera a la forma del rotor a analizarse. En la Figura 3.3 se visualiza la estructura, cuyas medidas están en cm y la Tabla 3.4 da una descripción de los materiales utilizados.

Figura 3.3 Plano de la base posterior en cm (vista frontal e isométrica)



Plano realizado en el software AutoCAD (Cárdenas Frank , 2019)

Tabla 3.4. Descripción de la base Mayor

Sección	Material	Descripción
A	Acero	Tuerca que atraviesa la máquina para ser ajustada a la mase mayor
B	Acero	Estructura metálica que sostiene la base flotante y el peso del rotor
C	Acero	Tornillos que gradúan la altura de las bases para dejar al rotor nivelado

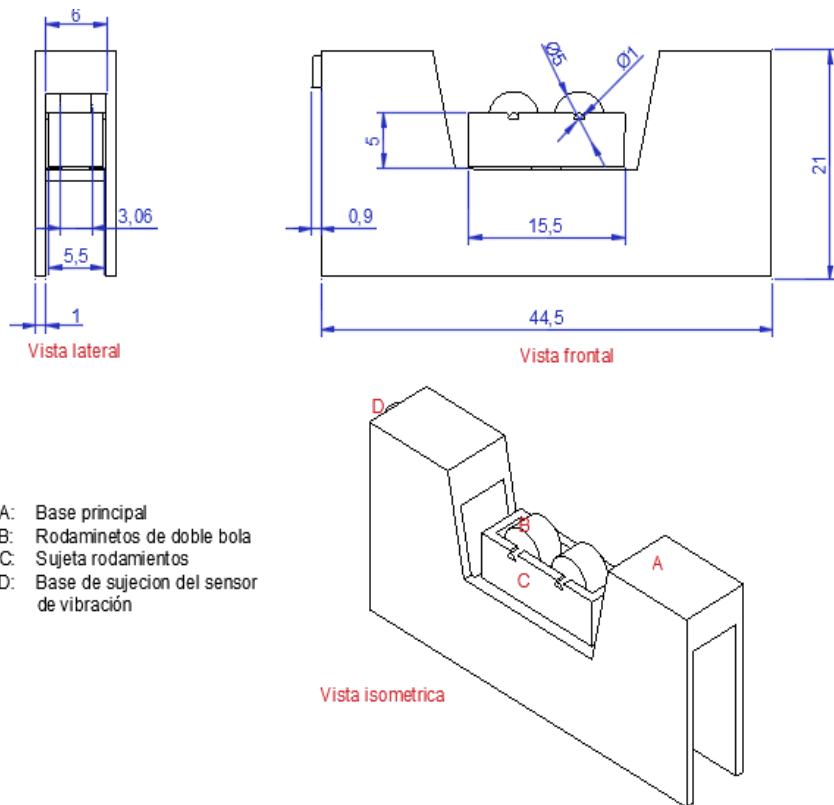
(Collaguazo Edison, 2019)

### 3.1.4 Bases Flotantes

Bases necesarias para alojar el rotor. Estas poseen 3 grados de libertad las cuales le permiten moverse verticalmente en el eje “x”, en el eje “y” y de manera rotacional en el eje z. Con esto se consigue simular las vibraciones que son producidas por

rodamientos flojos y/o por descompensación de peso en el cuerpo del rotor. Los rodamientos ubicados en la parte central de la base flotante permiten encajar al rotor de tal manera que este pueda girar libremente y con el menor esfuerzo posible. En la Figura 3.4 se aprecia los planos detallados de dicha bases flotantes expresados en cm y la Tabla 3.5 detalla los materiales utilizados. Cabe decir que se implementaron dos de estas bases es decir una para cada base vertical.

Figura 3.4 Plano de las bases flotantes en cm (vistas frontal lateral e isométrico)



Plano realizado en el software AutoCAD (Cárdenas Frank , 2019)

Tabla 3.5. Descripción Bases flotantes

Sección	Material	Descripción
A	Duraluminio (aleación entre hierro y aluminio)	Base de sujeción que reposa sobre las bases Verticales
B	Acero y aluminio	Rodamientos de doble bola especiales para soportar grandes cargas
C	Duraluminio	Base de sujeción de los rodamientos, cuenta con un rodamiento en su base el cual permita un movimiento circular sobre la base A
D	Acero	Base que sostiene al sensor (acelerómetro) el cual capta todas las vibraciones

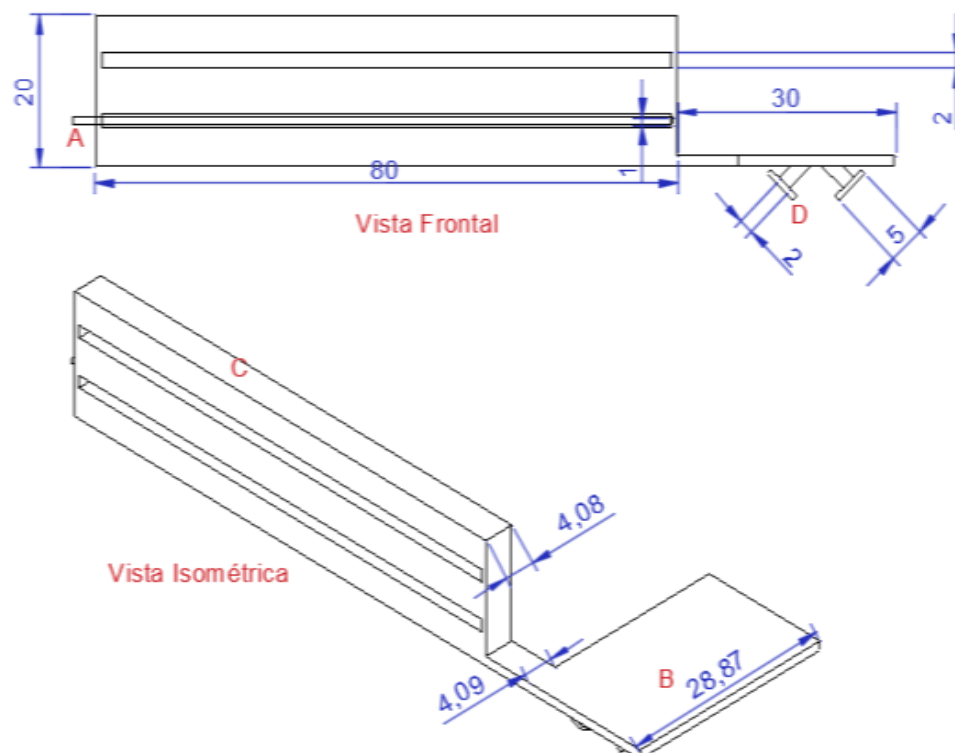
(Collaguazo Edison, 2019)

### 3.1.5 Mecanismo de sujeción de la polea

Este mecanismo es el que se encarga de sostener una polea, la cual envuelve al rotor sobre las bases flotantes para que así pueda girar y de esta manera captar las vibraciones mediante el sensor de aceleración. El mecanismo cuenta con partes móviles las cuales permiten graduar la polea en función del tamaño del rotor, así como dar el ajuste necesario para que esta sea capaz de girar el rotor con el menor rozamiento posible. Para una mejor descripción de este mecanismo, se ha separado en 2 partes diferentes las cuales son:

- **Base móvil de sujeción:** Base donde se ubican los rodamientos de sujeción de la polea y descansa el motor eléctrico. Esta cuenta con una mesa la cual en su parte inferior tiene acoplado 4 rodamientos dispuestos en forma de “V” lo que le permite a esta base deslizarse libremente por el tubo de la sección A como se aprecia en el plano de la Figura 3.1. En la Figura 3.5 se puede apreciar un plano del mecanismo expresado en cm, así como en la Tabla 3.6 una breve descripción de sus partes.

Figura 3.5 Plano Base móvil de sujeción en cm (vistamos frontal e isométrico)



Plano realizado en el software AutoCAD (Cárdenas Frank , 2019)

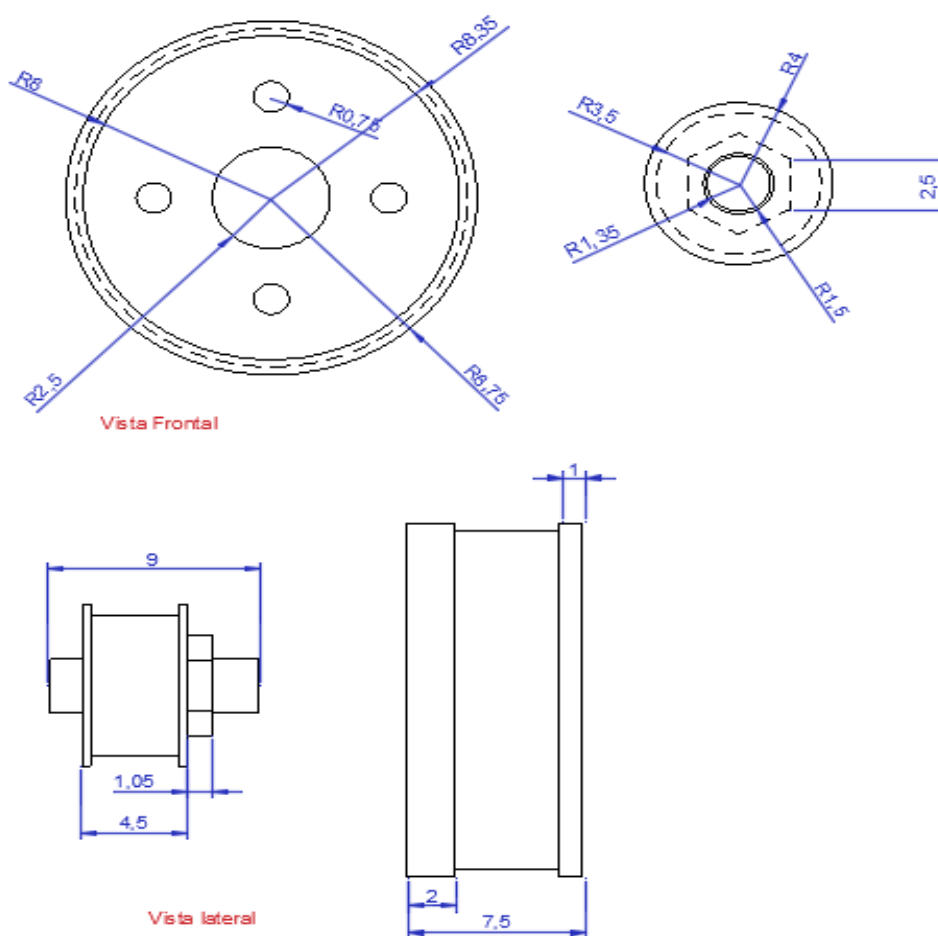
Tabla 3.6. Descripción Base móvil de sujeción

Sección	Material	Descripción
A	Acero	Tornillo sin fin para proporcionar ajuste a la polea
B	Acero	Mesa de soporte para el motor eléctrico
C	Acero	Soporte para los rodamientos de sujeción de la polea
D	Acero y Hierro	Rodamientos que permiten el desplazamiento de todo el mecanismo a lo largo de la base mayor

(Collaguazo Edison, 2019)

- **Rodamientos de transmisión:** Se tratan de 4 rodamientos, 3 de ellos se ubican dentro de las ranuras de la sección C descrita en la Figura 3.7 y uno más grande el cual ira acoplado al motor eléctrico sujeto en la sección B descrita en la figura 3.6, sirve de transmisión para mover toda la polea. En la Figura de 3.5 se puede apreciar a detalle estos rodamientos donde sus medidas se expresan en cm y una descripción de sus componentes en la Tabla 3.6.

Figura 3.6 Plano Rodamientos en cm (vistamos frontal y lateral)



Plano realizado en el software AutoCAD (Cárdenas Frank , 2019)

Tabla 3.7. Descripción rodamientos

<b>Tipo</b>	<b>Material</b>	<b>Descripción</b>
Rodamiento de sujeción	Acero	Rodamiento el sujeta la polea
Rodamiento de transmisión	Acero	Rodamiento acoplado al eje del motor que transmite el movimiento al rotor de prueba por medio de la polea

(Collaguazo Edison, 2019)

### 3.1.6 Motor Eléctrico

Se trata de un motor eléctrico trifásico de 3 HP de la marca WEG, el cual va sujeto mediante pernos a la sección B descrita en la Figura 3.5 siendo este el encargado de transmitir todo el movimiento mediante la polea hacia el rotor ubicado en la base flotante. En el eje del motor eléctrico se ubica el rodamiento de transmisión tal como se muestra en la Figura 3.7, además en la Tabla 3.8 se describen las características principales de este motor eléctrico.

Figura 3.7 Motor eléctrico con rodamiento de transmisión en el eje



Motor eléctrico montado en la base adecuada sobre la maquina balanceadora (Cárdenas Frank , 2019)

Tabla 3.8. Características Motor Trifásico

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
Tipo	Jaula de ardilla
Alimentación	Trifásico
Conexión	Y
Voltaje nominal	220 V
Potencia	3Hp
Velocidad nominal	3450 rpm

(Collaguazo Edison, 2019)

En la Figura 3.8 se puede apreciar el montaje de todas las partes que constituyen a la máquina balanceadora con. Para su correcto funcionamiento es necesario nivelar la

máquina de tal manera que no produzca vibraciones con respecto al suelo, así se evita que los sensores capten vibraciones innecesarias durante la prueba de análisis

Figura 3.8 Estructura completa de la máquina balanceadora de rotores eléctricos



Fotografía tomada de la maquina balanceadora completamente montada (Cardenas Frank & Collaguazo Edison, 2019)

### 3.2 Implementación de la etapa de potencia

Esta etapa es la encargada de controlar al motor eléctrico, el cual se acopla mediante un sistema de transmisión al rotor para que este pueda girar libremente sobre las bases flotantes y así poder captar todas las vibraciones que posea dicho rotor. En la Figura 3.9 se puede apreciar cómo está constituida toda la etapa del control para el motor eléctrico anclado a la base de la máquina.

Figura 3.9 Tablero de mando para motor eléctrico



Fotografía del tablero de mando del motor de para el mando (Cárdenas Frank , 2019)



### 3.2.1 Variador de frecuencia

En la Figura 3.9 se aprecia marcado como A, un variador de frecuencia de la marca Powtran. Este es el encargado de accionar y controlar la velocidad del motor eléctrico en la base de la máquina balanceadora. La Tabla 3.9 muestra las características más relevantes de este variador.

Tabla 3.9. Características del variador de frecuencia Powtran modelo PI130

Características	Descripción
Alimentación	220 V
Tipo de tensión de entrada	Bifásica
Tipo de tensión de salida	Trifásica
Potencia nominal	0,4 KW
Potencia máxima	2,2 KW
Entradas digitales	5
Entradas Analógicas	2
Salidas analógicas	1
Protocolos de comunicación soportados	Modbus , Rs 485
Rango de frecuencia de operación	50 Hz a 400 Hz

Características relevantes del motor trifásico de la maquina balanceadora (Collaguazo Edison, 2019)

Dentro del manual que incluye el fabricante en este producto, Se aprecia de manera detallada un esquema mostrando las conexiones externas, así como los parámetros de configuración del equipo para poder controlar el motor trifásico. En la Figura 3.10 aprecia el diagrama de conexiones proporcionado por el fabricante Powtran.

Figura 3.10 Diagrama de conexiones del variador de frecuencia Powtran

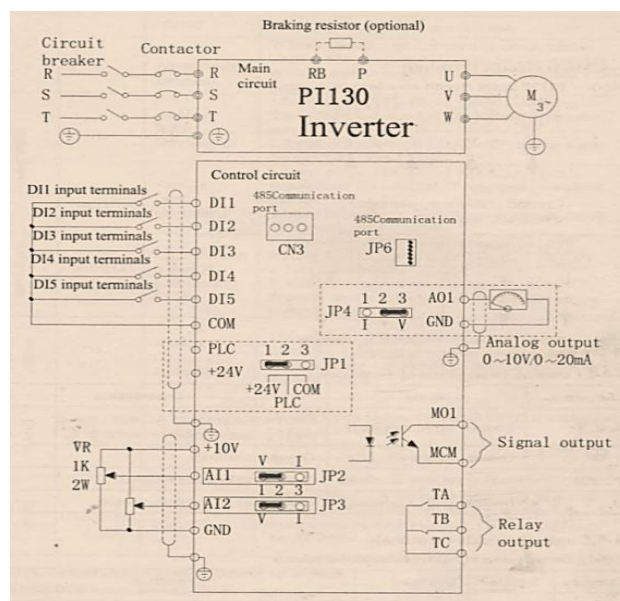


Diagrama facilitado por el fabricante (powtran technology, 2018)

Las funciones del variador de frecuencia se controlan de manera remota y son necesarias las siguientes conexiones:

- Conexión de 1 entrada digital (selector de 2 vías) en el puerto DI1.
- Conexión de un potenciómetro de 5K en el puerto AI1.
- Conexión de salida analógica (para monitorear la velocidad).

Por otra parte, la configuración del equipo se la realiza muy fácilmente mediante las teclas ubicadas en la parte frontal del equipo de la siguiente manera:

- Se ingresa a la configuración mediante la tecla PROG.
- Con la ayuda de las flechas de navegación se selecciona la función a modificar.
- Mediante la tecla ENTER se ingresa a la sub categoría dentro de la categoría principal, así como se guarda los cambios establecidos.

En la Tabla 3.10 se puede observar detalladamente la configuración realizada.

Tabla 3.10. Tabla de configuración para el variador Powtran

<b>Parámetro</b>	<b>Función</b>	<b>Configuración de fabrica</b>	<b>Configuración establecida</b>
Frecuencia de operación	F0.01	50 Hz	60 Hz
Selección de modo de operación	F0.02	Canal de comando de teclado	Ajuste analógico AI1
Canal de operación	F0.04	Canal de comando de teclado	Canal de comando por terminal
Frecuencia de salida máxima	F0.08	50Hz	60Hz
Selección de función del terminal DI1	F1.00	Sin función	Puesta en marcha
Selección de salida analógica	F2.04	Frecuencia de operación	Velocidad de operación
Potencia del motor	b0.01	0,4 KW	2,2 KW
Voltaje del motor	b0.02	440 V	220 V
Clasificación de velocidad del motor	b0.04	1800 RPM	3600 RPM

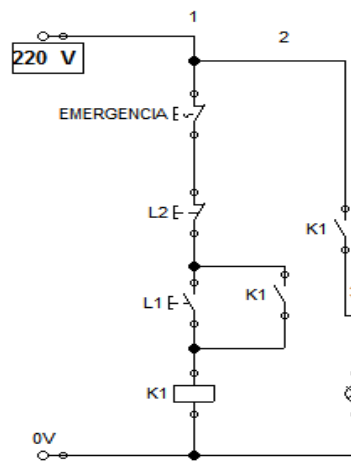
Principales funciones configuradas en el variador de frecuencia (Cárdenas Frank , 2019)

### 3.2.2 Sistema de Encendido

El sistema de encendido que controla al variador está dado por las partes B y C especificado en la imagen de la Figura 3.9, los cuales son un contactor de 2,2 KW

potencia de la marca Camco y un interruptor bifásico de 10 A (amperios) de la marca CNC, los cuales se encargan de energizar y proteger de descargas al variador de frecuencia respectivamente. En la Figura 3.11, se puede ver el diagrama unifilar implementado.

Figura 3.11 Diagrama de mando simulado en el software fluidsims de Festo



Circuito diseñado e implementado en el tablero de control (Cárdenas Frank , 2019)

Cabe decir que solo se ocupan 2 de los 3 hilos que posee el contactor debido a que el variador solo necesita una alimentación bifásica. En la Figura 3.12 se puede apreciar una foto del tablero de control por la parte frontal con todos sus elementos de mando para controlar el motor trifásico.

Figura 3.12 Tablero de control (vista frontal)



1. Luz testigo de encendido.
2. Botón de encendido del sistema.
3. Botón de apagado del sistema.
4. Selector de accionamiento para el variador de frecuencia.
5. Pulsador de paro de emergencia.
6. Potenciómetro de control de frecuencia de salida.

Fotografía que muestra el tablero listo para operar (Collaguazo Edison, 2019)

### 3.3 Diseño e implementación del hardware de adquisición de datos

Para analizar las vibraciones, es necesario implementar una tarjeta de adquisición de datos para que las señales previamente acondicionadas puedan ser procesadas y de esta manera obtener datos susceptibles de ser analizados para determinar en qué punto y con cuanta amplitud se genera el desbalanceo en los rotores eléctricos. La tarjeta cuenta con dos etapas principales. Un tacómetro digital, el cual se encarga de tomar los datos de velocidad del rotor a balancearse y un acelerómetro piezoeléctrico digital que toma las vibraciones provenientes de la máquina balanceadora.

#### 3.3.1 Diseño del tacómetro digital

Un tacómetro digital básicamente toma los pulsos que provienen de un sensor digital, y los traduce en revoluciones por segundo. La implementación consta de un microcontrolador 16f873A y el sensor digital E18.

Las mediciones efectuadas serán de la frecuencia con la que esos pulsos se dan o en otras palabras contar la cantidad de pulsos que son tomados por el sensor, para lo cual emplearemos el registro TMR0 (Time Register cero). Este cuenta con las siguientes características.

- Contador de 8 bits.
- Pre-escalador 8 bits. (compartido con el perro guardián)
- Generación de interrupción por desbordamiento.
- Selección de flanco de reloj externo programable.

El registro al ser de 8 bits solamente cuenta de 0 a 255 pulsos y cuando llega al límite este se desborda y se reinicia a 0. De ser el caso en el que cuente más se puede corregir este error tomando los datos cada 500 ms, y así lograr velocidades más altas si se lo requiere. Para el cálculo de la velocidad en RPM se parte de:

$$1 \text{ Rev} = 1 \text{ Pulso}$$

$$1 \text{ min} = 60 \text{ seg}$$

De donde:

$$RPM = 60 \times pulso$$

Para obtener más precisión se puede aumentar la cantidad de puntos dentro del motor y así obtener un valor más exacto por lo que obtendríamos la ecuación

$$RPM = (60 \times pulso)/puntos \quad \text{Ec.(3.1)}$$

Este valor se muestra directamente en un LCD, así como al mismo tiempo se mostrará en el HMI diseñado en el Software de Labview, para lo que se toma la señal de PWM. Esta señal PWM tiene una componente DC (corriente continua). Promedio la cual mediante la aplicación de un filtro pasa bajos RC de primer orden se destaca dicha componente DC y de esta manera aproximar esta señal PWM a una señal analógica. Dicho filtro se puede estimar de la siguiente manera:

La frecuencia de oscilación que recomienda el fabricante es de:

$$f_{pwm} = 500 \text{ KHz}$$

La frecuencia de corte será al menos 20 veces la frecuencia del PWM, por tanto:

$$f_0 = \frac{600 \times 10^3}{20}$$

$$f_0 = 30 \text{ KHz}$$

Además, la frecuencia de corte viene dada por la ecuación 3.2:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \times R \times C} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Por lo que resulta fácil proponer un valor de uno de los elementos y estimar el otro valor. Se propone un valor de capacitor igual a 10 nF, debido a que armar un arreglo de resistencias resulta más fácil de implementar, por tanto tenemos:

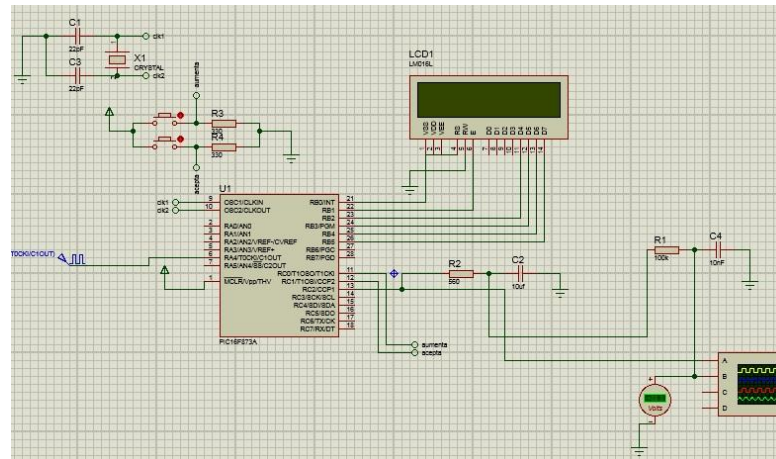
$$R = \frac{1}{2\pi \times f_0 \times C}$$

$$R = \frac{1}{2\pi \times 250 \times 10 \times 10^{-9}}$$

$$R = 530 \Omega$$

Este valor comercialmente resulta difícil de estimar, así que se coloca una resistencia de 560 Ω (ohmios). La Figura 3.13 muestra un esquemático del circuito a implementarse para el tacómetro digital.

Figura 3.13 Circuito esquemático simulado en Proteus para el tacómetro digital



Circuito esquemático previamente ser implementado (Cárdenas Frank , 2019)

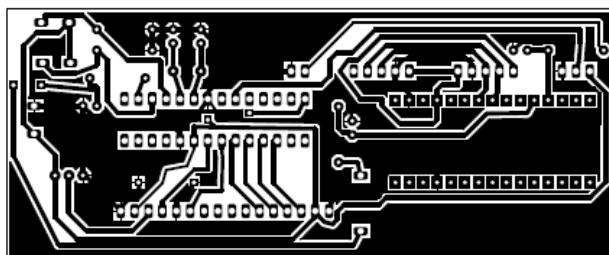
En el Anexo 2 se muestra el código necesario para la implementación del tacómetro digital

### 3.3.2 Diseño e Implementación de la tarjeta de adquisición de señales

Para la toma de los datos físicos provenientes de la máquina balanceadora se utilizó como punto de interfaz una placa Arduino Nano, la cual toma el dato de velocidad previamente acondicionado descrito en el inciso 3.3.1. Además, los datos provenientes del acelerómetro digital MPU6050 el cual integra en su encapsulado un acelerómetro digital de 3 ejes, un giroscopio digital de 3 ejes y un sensor de temperatura. Necesita 5 hilos físicos mediante los cuales se energiza el sensor, se establece la comunicación y se asigna la dirección respectiva para cada dispositivo.

Con la ayuda del software de Proteus se implementó una tarjeta de adquisición que sea capaz de integrar el tacómetro digital, así como el Arduino con sus respectivas conexiones a los sensores. La Figura 3.14 muestra el diseño del PCB resultante.



Figura 3.14 PCB para la tarjeta de adquisición de datos



Captura tomada directamente del software ares de proteus (Cárdenas Frank , 2019)

Una vez fabricada, la tarjeta fue montada sobre una caja de plástico. En la Tabla 3.11 se detalla los componentes de toda la tarjeta de adquisición implementada.

Tabla 3.11 Descripción de la tarjeta de adquisición de datos

	<p><b>Vista posterior:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>A. Entrada sensor de velocidad E18</li> <li>B. Entrada acelerómetro (dirección 0x69)</li> <li>C. Entrada acelerómetro (dirección 0x68)</li> <li>D. Jack de corriente.</li> </ul>
	<p><b>Vista frontal:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>A. Botón de encendido</li> <li>B. Botones de selección de puntos del tacómetro</li> <li>C. Pantalla de visualización</li> <li>D. Leds de estado del Arduino</li> <li>E. Entrada USB</li> </ul>

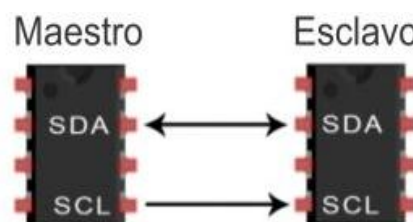
Fotografías de la parte frontal y posterior de la tarjeta de datos (Collaguazo Edison, 2019)

### 3.4 Procesamiento de la señal de aceleración

#### 3.4.1 Lectura de las señales mediante el protocolo I2C

El protocolo I2C por sus siglas en inglés (inter-integrante circuit) es un protocolo de comunicación serial, el cual permite intercambiar información desde el dispositivo maestro hacia varios esclavos al mismo tiempo por medio del mismo canal de comunicación. Este protocolo utiliza solo dos vías de comunicación como se puede ver en la figura 3.15

Figura 3.15 Esquema de comunicación del protocolo I2C



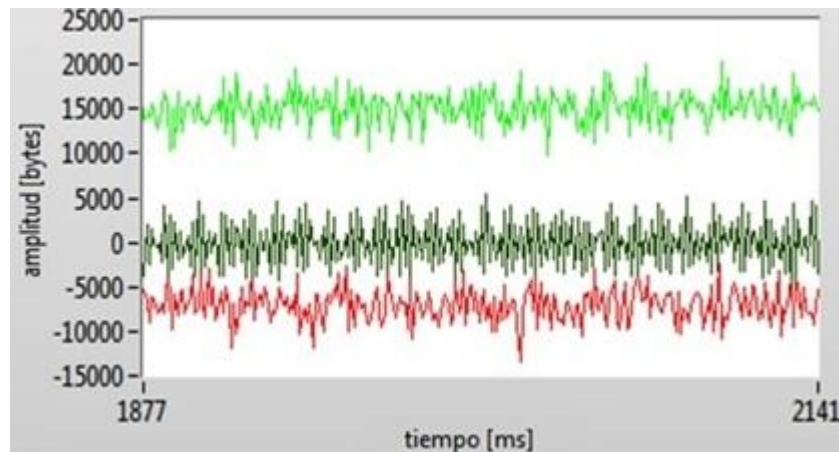
Esquema sencillo para el protocolo de comunicación I2c (Morales, 2017)





Idealmente las señales de aceleración para el eje X, eje Y e eje Z deben ser 0, 0 y 16348 respectivamente. Por el contrario, se observa en la Figura 3.17, las señales están desplazadas de donde idealmente estas deberían estar posicionadas, a este desplazamiento se lo conoce como “offset” por lo cual es necesario calibrar el sensor para eliminar dicho offset.

Figura 3.17 Aceleración obtenida por la interfaz I2C de Arduino



Señales obtenidas por el acelerómetro en x y z respectivamente (Cárdenas Frank , 2019)

### 3.4.2 Calibración del acelerómetro

La calibración del sensor se realiza mediante la IDE de Arduino en su versión 1.8.9, para lo cual es necesario utilizar las siguientes librerías MPU5060.h, I2Cdev.h y Wire.h. El programa se ejecuta en un sketch creado en la IDE de Arduino que realiza las mediciones respectivas en el sensor.

Se toma 1000 muestras provenientes del sensor, de las cuales se ignoran las 100 primeras mediciones por efectos de inicialización para descartar datos erróneos, tomando la media de todas estas mediciones.

Una vez calculada la media, se obtiene el offset respectivo de corrección el cual será colocado como un factor de corrección. Se verifica si el sensor está dentro el rango nominal, de serlo así, el sensor está listo para empezar con las mediciones, caso contrario es necesario volver a calibrar el sensor hasta lograr el resultado más adecuado.

En la figura 3.18 se muestra la calibración del sensor utilizando el monitor serial de la IDE de Arduino inicializada previamente a 115.200 baudios de transmisión.

Figura 3.18 Función de calibración

```
Lecturas del sensor con offsets:      -9      -1      16387  0      3      1
nuevos offset offsets: -2431  -619   3216   43     -178  -61

los datos se muestran como : accelX accelY accelZ giroX giroY giroZ
verifique que las lecturas sean cercanas a  0 0 16384 0 0 0
```

Valores de calibración obtenidos y comparados con los valores ideales (Cárdenas Frank , 2019)

No obstante, las unidades que el sensor entrega no son las unidades reales de aceleración, ya que simplemente expresan el valor de la medición en cuentas entregadas directamente por el ADC de 16 bits que el sensor cuenta y pasa directamente a la tarjeta de adquisición, por tanto, los valores obtenidos en el registro, deben ser transformados en unidades de aceleración con la ecuación 3.3

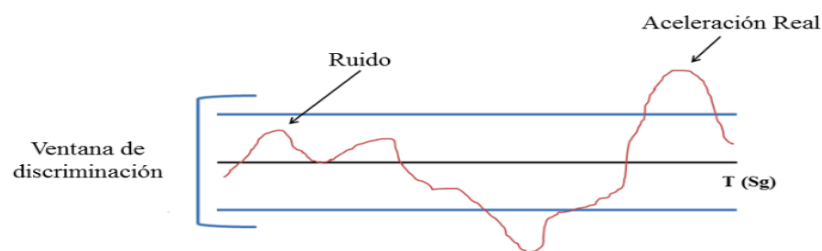
$$a[G] = \frac{\text{medicion} \times \text{FSR}}{2^{16}} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Donde FSR representa el valor de la escala de sensibilidad del sensor, los cuales se expresan como 2g, 4g, 8g y 16g, seleccionables directamente en el bloque proporcionado por el toolbox de Labview como se puede apreciar en la Figura 3.16

### 3.4.3 Ventana de discriminación

La señal adquirida es una señal con mucho ruido, que incluso sin movimiento produce valores no deseados para lo cual se debe crear una ventana de eliminación de componentes parasitas. En la Figura 3.19 se muestra un esquema de cómo se obtiene la señal del sensor y la zona que se pretende eliminar.

Figura 3.19 Eliminación de la señal indeseable



Esquema representativo para la ventana de discriminación de ruido del sensor (Morales, 2017)

Para discriminar estos valores, basta con crear una pequeña rutina que inhíba valores entre 0,07 y -0,07 y que deje pasar la señal cuando supere estos valores.

### 3.4.4 Diseño del filtro de media móvil

Una vez eliminado los valores parásitos se procede a implementar el filtro en sí, que actuará sobre toda la señal. El filtro de media móvil exponencial como pasa bajos es un tipo de filtro que calcula el valor promedio de un número específico de datos, recalculando periódicamente y obteniendo el valor más antiguo en favor del valor más reciente del período el cual se puede estimar mediante la ecuación 3.4.

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n - k] \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Para el cálculo de la muestra 100 de un filtro de largo M=5 se tiene:

$$y[100] = \frac{x(100) + x(99) + x(98) + x(97) + x(96)}{5}$$

El comportamiento de este sistema, se basa en la convolución, la cual proporciona una respuesta de una señal dada vs otra señal, que usualmente se toma al impulso unitario. Su ecuación vendrá dada de la siguiente forma:

$$(h * x)[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h[k]x[n - k] \quad \text{Ec. (3.5)}$$

En la Figuran 3.20 se puede observar la respuesta al impulso para un M=5

Figura 3.20 Respuesta al impulso para un filtro sin media simétrica en  $mm/s^2$



Previa respuesta por el filtro al impulso (Cárdenas Frank , 2019)

Se obtiene entonces:

$$h_{ma}(n) = \begin{cases} \frac{1}{M} & \text{si } n = 0 \text{ hasta } M - 1 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

El valor del filtro se desplaza mucho con respecto a su muestra original produciendo un desfase. Entre más alto sea el orden del filtrado, mayor será su desfase con respecto a la onda original. Para corregir esto se ejecuta un promedio simétrico que vendría dado de la siguiente forma.

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{-(M-1)/2}^{(M-1)/2} x[n - k] \quad \text{Ec. (3.7)}$$

Por ejemplo, para un  $M=5$  y tomando la muestra  $n=100$  como referencia los datos serán tomados de la siguiente forma:

$$y[100] = \frac{x(98) + x(99) + x(100) + x(101) + x(102)}{5}$$

Cabe mencionar que, bajo estas condiciones, el valor de  $M$  debe ser un número impar por la simetría de la toma de datos. En la Figura 3.21 se observa la respuesta al impulso para este caso.

Figura 3.21 Respuesta al impulso para un filtro con media simétrica



Previa respuesta al impulso con media simétrica (Cárdenas Frank , 2019)

Se obtiene:

$$h_{ma}(n) = \begin{cases} \frac{1}{M} & \text{si } n = -(M - 1) \text{ hasta } (M - 1) \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad \text{Ec. (3.8)}$$

Con estos resultados se llega a la conclusión de que se trata de un filtro recursivo, es decir que siempre depende del valor previo antes del valor tomando. Se toman dos muestras contiguas y aplicar el filtrado simétrico para  $M=5$  de la siguiente manera:

$$y[100] = \frac{x(98) + x(99) + x(100) + x(101) + x(102)}{5}$$

$$y[101] = \frac{x(99) + x(100) + x(101) + x(102) + x(103)}{5}$$

Se estima el valor [101] a partir del valor [100], tomando la media aritmética se obtendría la siguiente expresión siguiente forma:

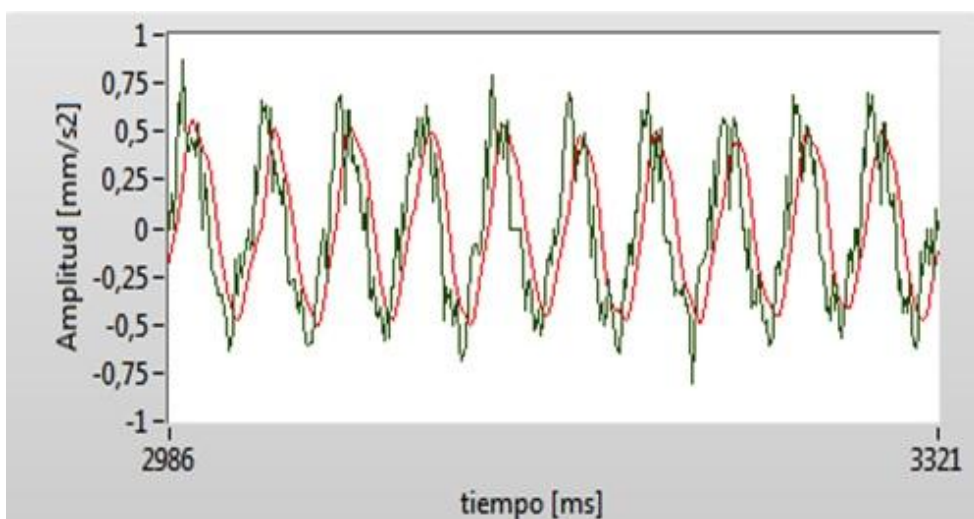
$$y[101] = y[100] + \frac{x[84] - x[77]}{5}$$

Se sabe que los valores de  $x[84]$  y  $x[77]$  son los puntos más alejados. Con los valores de convolución obtenidos en la ecuación 3.7, La ecuación del filtro se escribe como:

$$y[n] = y[n - 1] + \frac{x\left[n + \frac{M - 1}{2}\right] - x\left[n - \frac{M - 1}{2} - 1\right]}{M} \quad \text{Ec. (3.9)}$$

En la Figura 3.23 se observa la señal muestreada vs la señal suavizada para un  $M= 5$  obtenidas por el filtro de la ecuación 3.9.

Figura 3.22 Señal adquirida (verde) vs señal filtrada (roja)



Señal suavizada por medio de un filtro de media móvil (Cárdenas Frank , 2019)

### 3.4.5 Determinación de la velocidad y posición del desbalance

La señal obtenida por el sensor se trata de una señal que mide la aceleración del sistema. No obstante, es posible determinar otras mediciones que pueden expresar otras magnitudes como lo son la velocidad y posición del sistema. El software de Labview cuenta con una función la cual integra señales en el dominio del tiempo el cual está basado en la regla de Simpson 1/3 que a su vez se basa en la regla del trapecio. El algoritmo realiza aproximaciones sucesivas de cada tramo de la señal obtenida, el cual vienen dado por un polinomio de primer orden, así:

$$P_1(x) = f(a) + \frac{f(b) + f(a)}{b - a}(x - a) \quad \text{Ec. (3.10)}$$

Siendo a y b intervalos de la señal muestreada, entonces al sustituir en la integral:

$$I = \int_a^b f(x)dx \approx \int_a^b P_1(x)dx \approx \int_a^b f(a) + \frac{f(b) + f(a)}{b - a}(x - a) dx \quad \text{Ec. (3.11)}$$

Pero este método resulta bastante impreciso, así que una mejor aproximación se logra utilizando polinomios de orden mayor, generando así resultado. Este trabajo se lo atribuye a Thomas Simpson llevando este algoritmo su nombre, el cual está dado por la ecuación 3.12.

$$I = \int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{3}[f(a) + 4f(x_m) + f(b)], \quad \text{con } h = \frac{b - a}{2} \quad \text{Ec. (3.12)}$$

La señal de aceleración obtenida por el sensor, al momento de ser integrada se obtiene velocidad del sistema la cual se muestra en la Figura 3.23, muestra claramente la velocidad con la que se producen estas vibraciones.

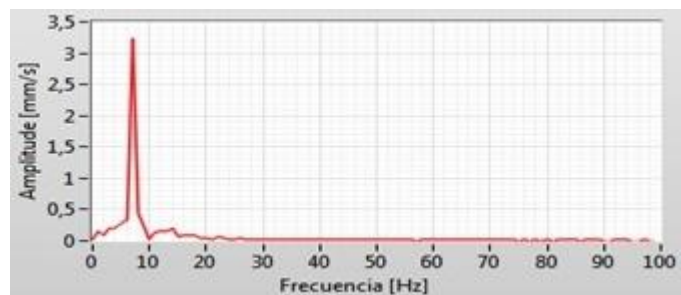
Figura 3.23 Señal de velocidad obtenida por integración



Señal aproximada a una señal de tipo cosenoidal (Collaguazo Edison, 2019)

Pero no basta con obtener una señal que muestre una forma de onda de velocidad, resulta necesario obtener una señal en el dominio de la frecuencia que muestre la amplitud de la señal de velocidad obtenida y sus componentes de frecuencia que ayudará a determinar el punto exacto del desbalance. Labview también posee una librería que extrae el espectro de una señal, el espectro obtenido muestra la distribución de las amplitudes para cada frecuencia en el fenómeno ondulatorio. En la Figura 3.24 se muestra el espectro obtenido para la velocidad.

Figura 3.24 Espectro de la señal de velocidad

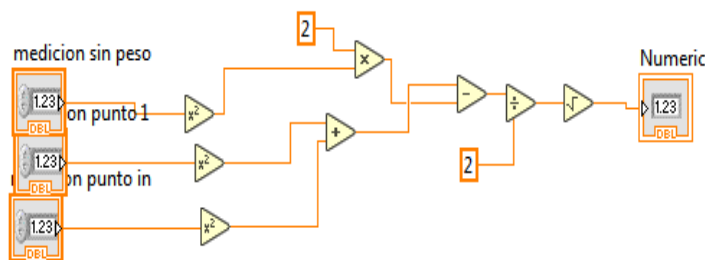


Impulso obtenido por la transformada de Fourier (Collaguazo Edison, 2019)

Es importante que siempre que se realice cada corrida de prueba, la velocidad sea siempre la misma en todo momento ya que si esta varía, se puede evidenciar en la frecuencia y en la amplitud de la componente fundamental del espectro, de ser así los resultados serían inconsistentes generando problemas en las mediciones finales.

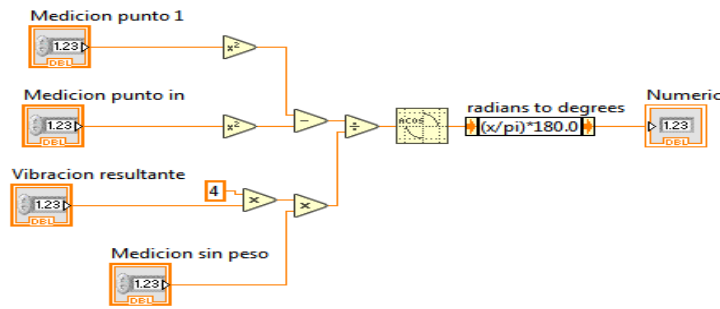
Para obtener el ángulo de corrección se implementa una función en Labview con ayuda de las ecuaciones descritas en capítulo dos, sección 2.2 de este trabajo. En la Figura 3.25 se muestra la función implementada para el cálculo de la vibración resultante, así como en la Figura 3.26 se muestra el cálculo del ángulo de corrección.

Figura 3.25 función implementada para el cálculo del desbalance total



Función en base a las ecuaciones de corrección (Cárdenas Frank , 2019)

Figura 3.26 función implementada para el ángulo de corrección

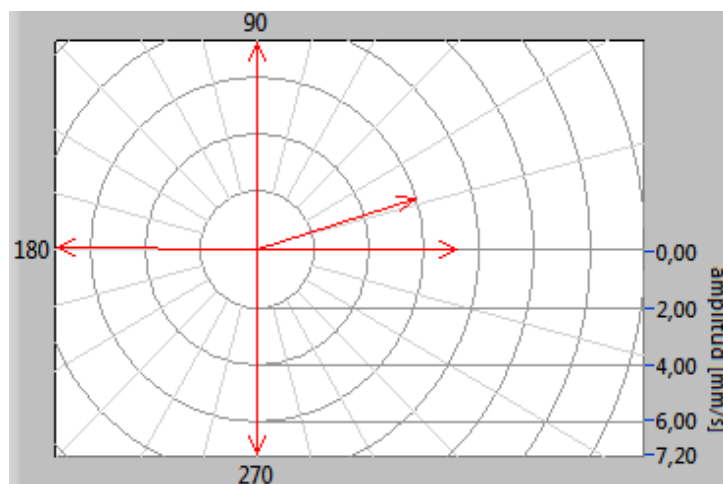


Función en base a las ecuaciones de corrección (Cárdenas Frank , 2019)

Estos datos son necesarios para realizar el cálculo de la masa de corrección que son colocados con el fin de corregir el desbalance dada por la ecuación 2.5.

Dependiendo del tipo de a balancear, estos pueden presentar unas ranuras donde resultará más fácil colocar los pesos de corrección, ya que es muy poco probable que el ángulo de corrección coincida con dichos puntos. El ángulo de corrección estimado se recorre al punto más cercano, siendo necesario primeramente tener una visualización clara de la amplitud del desbalance y de ángulo estimado como se muestra en la Figura 3.27

Figura 3.27 Diagrama polar



Se muestra el vector en el punto de descompensación (Collaguazo Edison, 2019)

La mayoría de rotores presenta álabes que se encuentran posicionados a 45° uno con respecto del otro, es decir hay 8 de estos alabes en la mayoría de los casos; ya depende del rotor que se esté balanceando. Por cálculo, en la mayoría se obtiene que



la masa de corrección se ubique justo ente dos de estos álabes siendo imposible colocar la masa de corrección calculada.

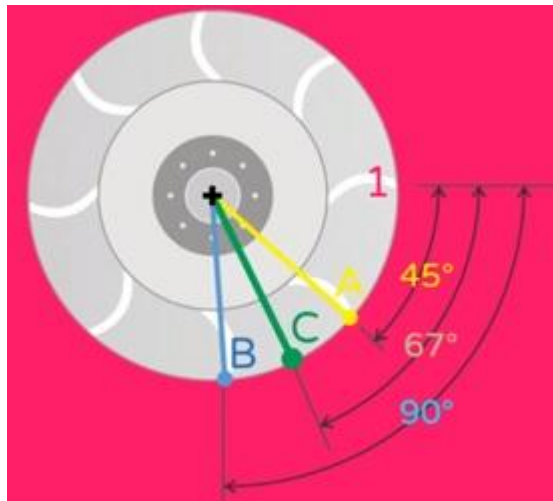
Para solucionar este problema, es posible calcular dos masas equivalentes a la masa de corrección estimada anteriormente, que se ubican en estos álabes contiguos y generen una fuerza equivalente a la fuerza que generaría la masa posicionada en la posición calculada por sí misma, estas ecuaciones son:

$$M_A = M_C \times \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad \text{Ec. (3.13)}$$

$$M_B = M_C \times \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad \text{Ec. (3.14)}$$

Donde  $\alpha$  representa el ángulo entre la masa de corrección obtenida en el álabe A y  $\beta$  el ángulo entre el alabe B y el ángulo de la masa de corrección obtenida. Por ejemplo, la masa de corrección resulta a  $67^\circ$  con respecto al punto 1, entonces los alabes que estarían ubicado entre este ángulo serían a  $45^\circ$  y a  $90^\circ$  ilustrado en la Figura 3.28.

Figura 3.28 Masa de corrección sobre los alabes físicos del rotor.



Esquema explicativo del posicionamiento de los ángulos de compensación (A-MAQ S.A, 2017)

En el ejemplo  $\alpha$  sería igual a  $22^\circ$  y  $\beta$  sería igual a  $23^\circ$  y de esta manera se estima 2 masas de corrección que igualen al a fuerza de nuestra masa de corrección calculada originalmente.

### 3.5 Implementación del HMI

La interfaz de usuario cuenta con una interfaz de bienvenida, en el cual se ingresa la contraseña para tener acceso al sistema. En el panel se aprecia un campo donde se ingresa la clave de usuario con el objeto de prevenir que cualquier persona opere el software sin el conocimiento previo del mismo. En la Figura 3.29 se muestra dicha interfaz, así como en la Tabla 3.12 una descripción de los componentes de dicha interfaz.

Figura 3.29 Pantalla de bienvenida



Bienvenida al software (Cárdenas Frank , 2019)

Tabla 3.12. Descripción de la interfaz de bienvenida

Indicador	Descripción
Campo clave	Ingresar clave de usuario para acceder al sistema
Campo A	Indica si la clave es aceptada o no
Botón ingresar	Acción para ingresar al sistema
Botón STOP	Para todo el sistema

(Collaguazo Edison, 2019)

Posteriormente se abre un panel que permite registrar los datos del motor a balancearse y a la información de la empresa de donde proviene dicho motor. Una vez ingresados los datos esta hoja se guarda en un archivo de Word que gestiona de mejor manera los trabajos a realizarse por la empresa. En la Tabla 3.13 brinda una descripción de la empresa y en la Tabla 3.14 los datos de placa del motor eléctrico que ingresa para los trabajos de balanceo.

Figura 3.30 Registro de datos del motor

**DATOS DE LA EMPRESA**

Empresa <input type="text" value="IIVERSAN"/>	personal de contacto directo <input type="text" value="JUAN CARLOS"/>
Sucursal <input type="text" value="QUITO"/>	Responsable <input type="text" value="DIEGO SIMBAÑA"/>

**DATOS DE PLACA**

Marca del motor <input type="text" value="WEG"/>	Potencia [HP] <input type="text" value="10"/>
Numero de polos <input type="text" value="4"/>	Velocidad nominal [RPM] <input type="text" value="1800"/>
Tesion de trabajo <input type="text" value="220"/>	Conexion <input type="text" value="DELTA"/>

Ingreso de datos relevantes del rotor sometido a las pruebas (Cárdenas Frank , 2019)

Tabla 3.13. Descripción del registro de datos de la empresa

Indicador	Descripción
Campo empresa	Nombre de la empresa de donde proviene el rotor a balancear
Campo personal de contacto directo	Nombre del encargado por parte de la empresa de donde el rotor proviene
Sucursal	Ubicación física de la empresa
Campo responsable	Personal de Siproelectrik S.A quien realiza el trabajo de balanceo

(Collaguazo Edison, 2019)

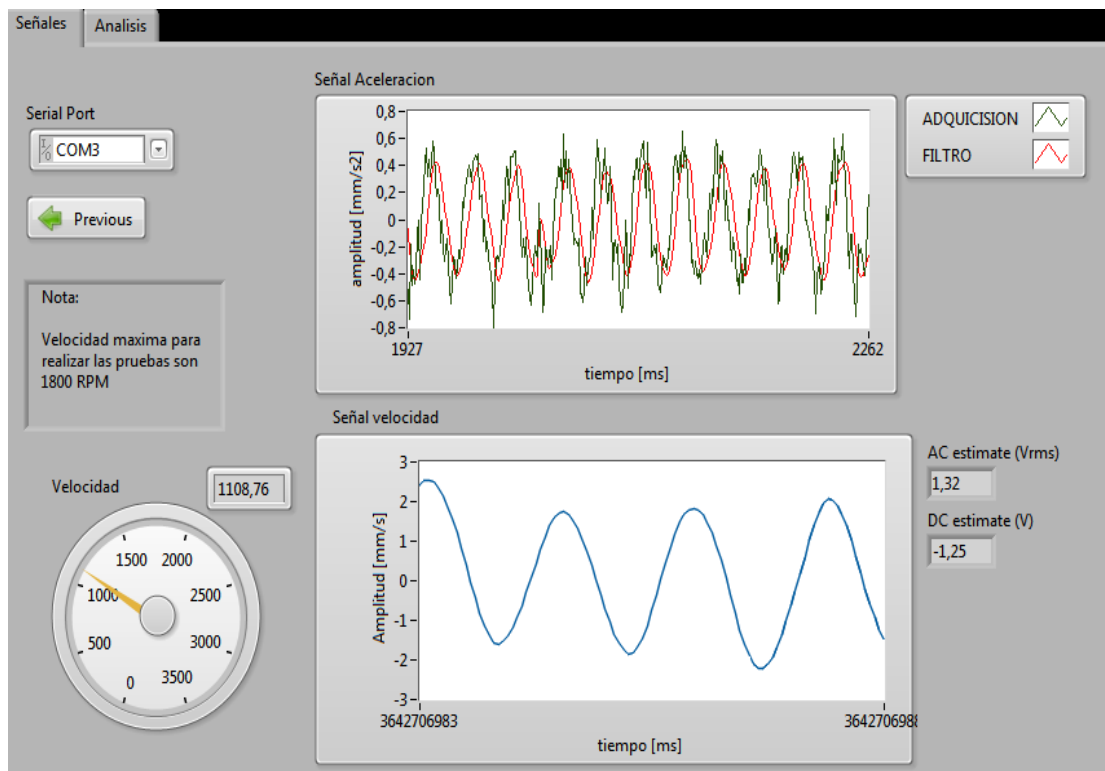
Tabla 3.14. Descripción del registro de datos de placa del motor

Indicador	Descripción
Campo marca del motor	Marca del motor receptado
Campo marca Potencia	Potencia a la que le motor trabaja
Campo número de polos	Numero de polos al cual trabaja
Campo velocidad nominal	Velocidad máxima que alcanza el motor
Campo tensión de trabajo	Tensión de trabajo nominal
Campo conexión	Conexión en la que le motor ingresa
Botón Previous	Regresa a la página de inicio
Botón Next	Avanza hacia la página de pruebas
Botón Save	Guarda la información colocada en los campos correspondientes

(Collaguazo Edison, 2019)

Una vez registrada y guardada la información solicitada le damos a la pestaña siguiente y pasamos el software de balanceo. Se puede ver dos pestañas donde en la primera muestra la señal de aceleración muestreada, la señal filtrada y las revoluciones por minuto con la que se ejecuta la prueba. Así se puede ajustar el sistema hasta obtener una señal medible. En la Figura 3.31 se muestra la interfaz diseñada, así como la Tabla 3.15 una breve descripción de la interfaz.

Figura 3.31 Adquisición de señales de los sensores



Obtención de las señales debidamente acondicionadas (Cárdenas Frank , 2019)

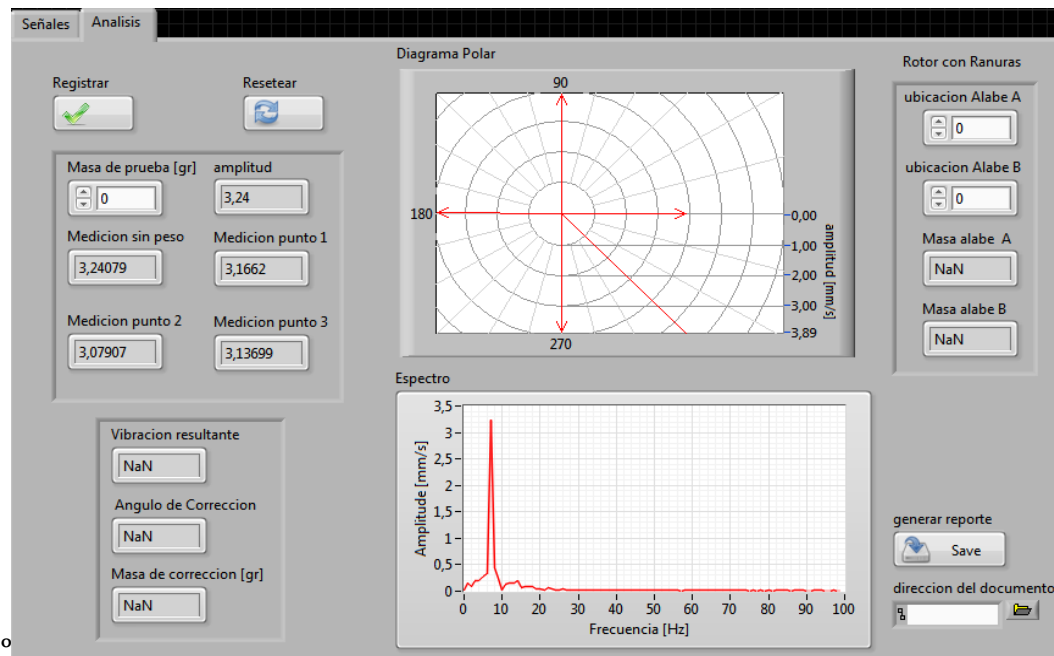
Tabla 3.15. Descripción de la interfaz de adquisición de señales de los sensores

Indicador	Descripción
Serial Port	Selecciona el puerto común para conectar Arduino a Labview
Botón Previous	Retorna a la pantalla de ingreso de datos de la empresa
Velocidad	Muestra la velocidad a la que el rotor está corriendo en la prueba
Imagen de Aceleración	Muestra la señal obtenida de aceleración así como la señal filtrada de la misma
Imagen de Velocidad	Señal integrada de aceleración para obtener velocidad
AC estimate	Muestra el valor pico de la señal de velocidad
DC estimate	Muestra el valor de continua promedio de la señal de velocidad

(Collaguazo Edison, 2019)

La segunda pestaña muestra un diagrama espectral, así como un diagrama polar apreciación del punto de desbalance exacto. En la parte izquierda se recopilan los datos medidos y con ayuda de las ecuaciones mostradas en el capítulo 2 es posible determinar la masa de corrección, el ángulo de corrección y la amplitud que resultaría después de balancear el rotor. En la parte izquierda de la interfaz, se muestra la estimación de la nueva masa de prueba con respecto a sus alabes contiguos, estimadas con ayuda de las ecuaciones 3.13 y 3.14 respectivamente. En la Figura 3.32 se muestra la pantalla para el análisis de la señal, así como la Tabla 3.16 brinda una descripción completa de la interfaz.

Figura 3.32 Etapa de análisis de las señales



Interpretación y análisis de las señales de vibración obtenidas (Cárdenas Frank , 2019)

Tabla 3.16. Descripción de la interfaz de análisis de las señales

Indicador	Descripción
Botón registrar	Registra los valores obtenidos en cada prueba
Botón resetear	Resetea todos los valores para empezar un nuevo balanceo
Masa de prueba	Indica la masa de pruebas seleccionada para empezar el análisis
Amplitud	Amplitud de velocidad obtenida por el acelerómetro
Medición sin peso	Valor tomado del rotor sin peso de pruebas

(Collaguazo Edison, 2019)

Tabla 3.16. Descripción de la interfaz de análisis de las señales (continuación)

<b>Indicador</b>	<b>Descripción</b>
Medición punto 1	Valor tomada en la primera corrida de prueba en el punto 1
Medición punto 2	Valor tomada en la segunda corrida de prueba en el punto 2
Vibración resultante	Vibración resultante después de 3 corridas de prueba
Angulo de corrección	Angulo de corrección resultante
Masa de corrección	Masa de corrección resultante
Imagen de espectro	Muestra el espectro de la señal de velocidad
Diagrama polar	Muestra un diagrama vectorial de amplitud y radio de desbalance
Botón generar reporte	Genera un reporte con todos los datos obtenidos de la prueba
Campo ubicación álabes A	Angulo de corrección más cercano a la posición del ángulo de corrección por la derecha
Campo ubicación álabes A	Angulo de corrección más cercano a la posición del ángulo de corrección por la izquierda
Campo Masa álabes A	Masa de corrección aproximada sobre el alabe A
Campo masa álabes B	Masa de corrección aproximada sobre el alabe A

(Collaguazo Edison, 2019)

Concluido el análisis y el trabajo de balanceo, estos resultados se guardan y se anexan al documento generado anteriormente para así tener todos los resultados de las pruebas. El Anexo 3, Anexo 4 y Anexo 5 muestra el código necesario para la implementación del HMI en su totalidad.

## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 4.1 Preparación de la máquina

Se empieza ajustando la longitud de la máquina hasta que el rotor pueda calzar sobre la misma. Para lograrlo, las tuercas ubicadas en los extremos de las bases, son movidas con la ayuda de una llave de ratchet, como se muestra en la Figura 4.1.

Figura 4.1 Ajuste de las bases a las dimensiones del rotor



Se muestra los puntos principales de ajuste para fijar a las dimensiones del rotor (Cárdenas Frank , 2019)

Posteriormente, ya con las bases bien aseguradas se procede a nivelar el rotor, para lo cual se emplean las tuercas de sujeción ubicadas en la base frontal hasta que las bases queden lo más niveladas posible, como se muestra en la Figura 4.2.

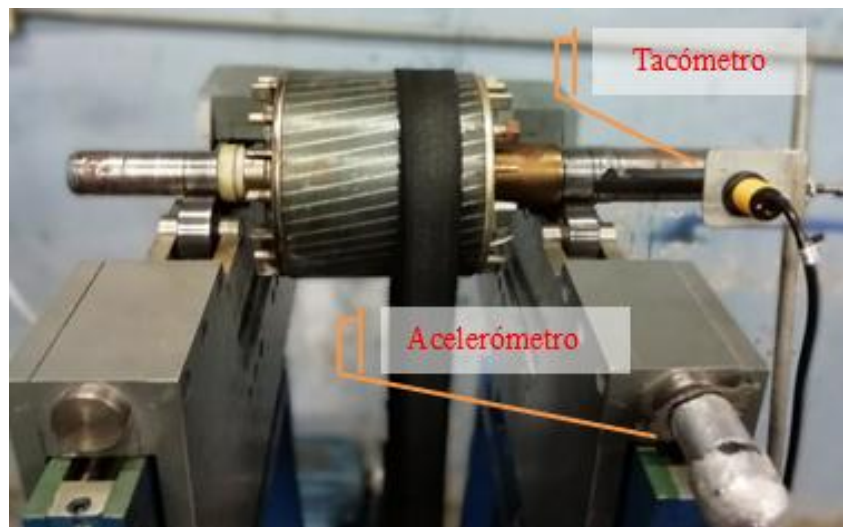
Figura 4.2 Nivelación de las bases flotantes.



Nivel mostrando las bases correctamente niveladas (Cárdenas Frank , 2019)

Una vez montado el rotor sobre la estructura, se ajusta la polea procurando que esta rodee al rotor lo más cerca de la mitad para evitar que dicho rotor ocasione un accidente al salirse de la polea. La polea tiene que ser ajustada solo lo suficiente para que no se mueva en el momento de arrancar el motor trifásico, de lo contrario se puede romper. Se ubican los sensores de aceleración y velocidad en sus lugares respectivos, además de una cinta negra en el eje con el fin que el tacómetro pueda tomar este pulso, como se indica en la Figura 4.3.

Figura 4.3 Sujeción del rotor y ubicación de los sensores.



Rotor de 10 en posición para empezar la prueba (Collaguazo Edison, 2019)

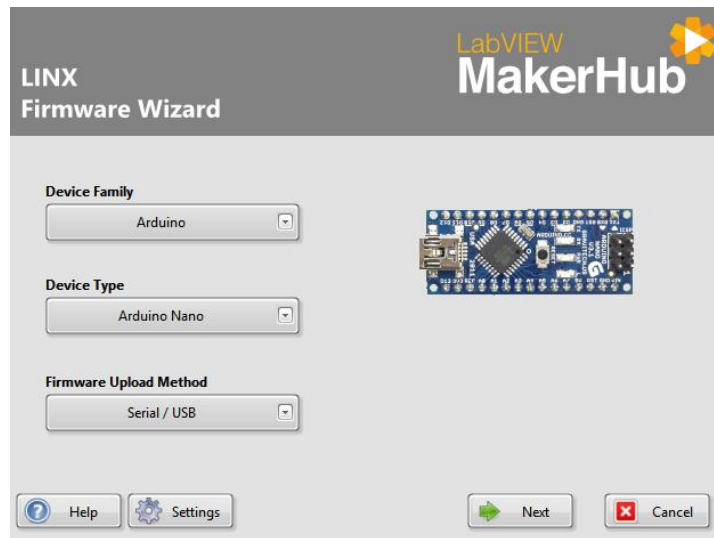
## 4.2 Preparación de la tarjeta de adquisición de datos

Para empezar con las pruebas, el primer paso es calibrar el sensor mediante el sketch de calibración respectivo en la IDE de Arduino. Hay que asegurarse que el sensor siempre este lo más recto posible siempre, las letras apuntando hacia arriba para que la calibración sea eficiente. El sketch de calibración se ejecuta las veces que sea conveniente, hasta que los valores de offset sean lo más cercanos a los valores recomendados como se detalla en la Figura 3.18.

Una vez los sensores se encuentren correctamente calibrados, se inicializa la comunicación entre Arduino y Labview. Para ello se utiliza a la barra de herramientas, seleccionamos `TOOLS/MAKERHUB/LINX/LINX FIRMWARE WIZARD`, apareciendo una ventana como se muestra en la Figura 4.4.



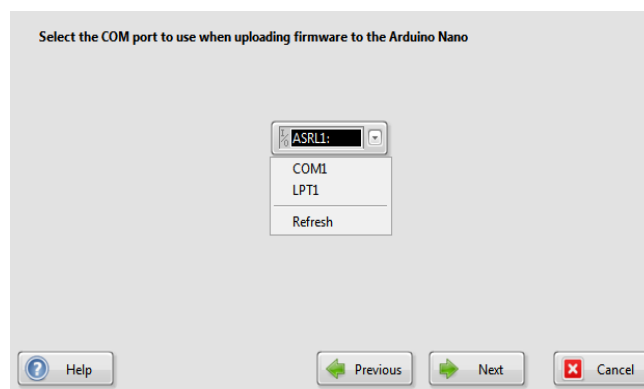
Figura 4.4: Selección del tipo de plataforma utilizada



Interfaz que permita la selección del dispositivo a conectar (Collaguazo Edison, 2019)

Se elige el tipo de dispositivo al cual se va comunicar; para esta aplicación en específico, es la tarjeta Arduino Nano. Seguidamente se da clic al botón Next, la ventana a continuación muestra la selección el puerto COM por donde se intercambian datos entre el sensor y Arduino, como se muestra en la Figura 4.3.

Figura 4.5: Selección del puerto COM



Muestra todos los puertos COM que posee la PC (Cárdenas Frank , 2019)

A partir de este punto bastará con darle al botón Next en las ventanas contiguas, hasta que el Firmware de LINX cargue la DAQ Arduino. Una vez establecida la comunicación USB/ Serial se ejecuta el HMI directamente.

### **4.3 Procedimiento del proceso de balanceo**

La prueba que se ejecuta para balancear este rotor se la conoce como 4 corridas sin fase, donde los pesos de prueba se colocan en las posiciones dadas en la Figura 2.4. El procedimiento se lo realiza de la siguiente manera:

1. Se hace girar el rotor sin pesos de corrección a una velocidad no mayor a 1800 rpm hasta que la señal obtenida se estabilice.
2. Se captura el dato de amplitud de la velocidad obtenida.
3. La segunda corrida de prueba se la realiza con un peso de corrección (previamente seleccionado) en cualquier punto del rotor, posteriormente se captura ese dato.
4. La tercera corrida de prueba se la realiza con el mismo peso de corrección seleccionado, pero ubicado a  $180^\circ$  de la posición de la segunda prueba.
5. La cuarta corrida de prueba se la realiza colocando el peso a  $90^\circ$  de la posición de la segunda prueba. Esta prueba sirve únicamente para determinar el sentido de giro del ángulo de corrección, así que no es necesario este dato.
6. Si el valor de amplitud de la cuarta prueba resulta mayor que el de la primera prueba, el peso se ubica en sentido horario, de ser menor se coloca en sentido anti horario

Todas las corridas de prueba siempre se efectúan a la misma velocidad, de no hacerlo así las lecturas serán erróneas.

### **4.4 Ejemplo de aplicación 1**

#### **3.1.7 Ensayo con un rotor jaula de ardilla de 10 Hp de baja velocidad**

Este ensayo se lo realizó sobre un rotor tipo jaula de ardilla de una máquina de 10 hp, de 4 polos bajo las siguientes condiciones.

- Velocidad de prueba a 1200 rpm.
- Peso de prueba 10 g (arandelas y tornillos).

Siempre se toma un punto de referencia desde donde se coloca el peso de prueba, para ello se marca cada uno de los alabes que posee dicho rotor como se muestra en la Figura 4.6. Cabe decir que siempre el rotor debe ser señalado en el mismo sentido de giro del motor eléctrico de la máquina la cual gira el rotor en sentido horario.

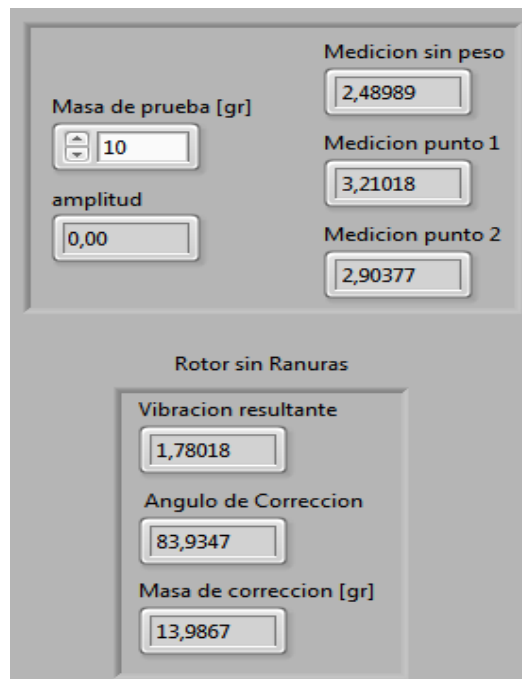
Figura 4.6: Rotor de 10hp señalado en sentido horario



Señalización de los alabes del rotor (Collaguazo Edison, 2019)

Siguiendo los pasos de la sección 4.3, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 4.7.

Figura 4.7 Resultados de las corridas de prueba sobre rotor de 10 hp

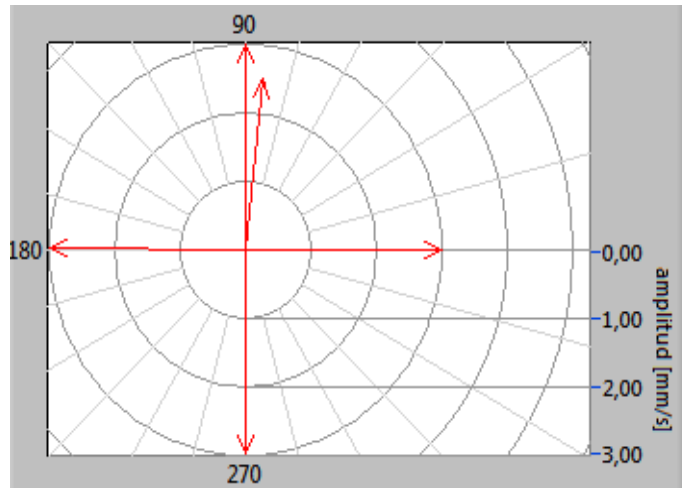


Mediciones después de las cuatro corridas del rotor (Collaguazo Edison, 2019)

Al observar estos valores se dicen dos cosas. La primera es que al ser el valor de la prueba 4 mayor al de la prueba 1, se coloca el peso en sentido horario; la segunda es que al analizar el diagrama polar obtenido en la Figura 4.8, se muestra claramente que la masa de corrección está se ubica a  $100^\circ$  con respecto al álabe de referencia

razón por la cual se debe estimar unos nuevos pesos de prueba sobre los álabes que el rotor físicamente posee.

Figura 4.8 Diagrama polar obtenido del análisis



Vector de corrección resultante (Cárdenas Frank , 2019)

### 3.1.8 Resultados

Se aprecia que este ángulo se posiciona entre los álabes 2 y 3 que se encuentran a 45° y 90° respectivamente, por tanto, es posible calcular 2 masas de corrección ubicada sobre dichos álabes, utilizando una función basada en las ecuaciones 3.13 y 3. 14. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.9

Figura 4.9 Resultados de las masas de corrección sobre los álabes 2 y 3

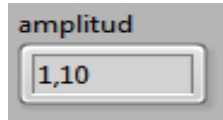
ubicacion Alabe A	45
ubicacion Alabe B	90
Masa alabe A	12,4305
Masa alabe B	2,09002

Posicionamiento de las nuevas masas de corrección en los álabes a 45 y 90 grados respectivamente (Cárdenas Frank , 2019)

Para verificar si la amplitud de la vibración se redujo ejecutamos una corrida de prueba con los pesos obtenidos, ubicados sobre los álabes respectivos del rotor. Se

obtuvo el siguiente resultado mostrado en la Figura 4.10. Un resultado favorable es cuando se obtienen vibraciones por debajo de  $2 \text{ mm/s}^2$  en máquinas de baja potencia.

Figura 4.10 Resultados de amplitud del rotor balanceado



Corrección de las vibraciones después del análisis (Collaguazo Edison, 2019)

Un resultado con esta exactitud difícilmente se puede lograr realizando a mano ya que mientras más grande sea la máquina, mayor exactitud se requiere para determinar el punto de desequilibrio.

## 4.5 Ejemplo de aplicación 2

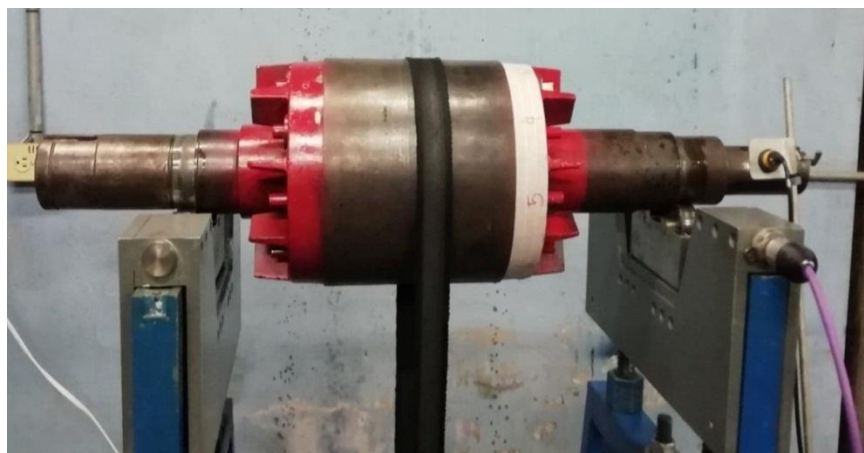
### 4.5.1 Ensayo con un rotor jaula de ardilla de 75 Hp de alta velocidad

Este ensayo se realiza sobre un rotor jaula de ardilla de una máquina de 75 HP, de 2 polos bajo las siguientes condiciones.

- Velocidad de prueba a 600 rpm.
- Peso de prueba 20 g (arandelas y tornillos).

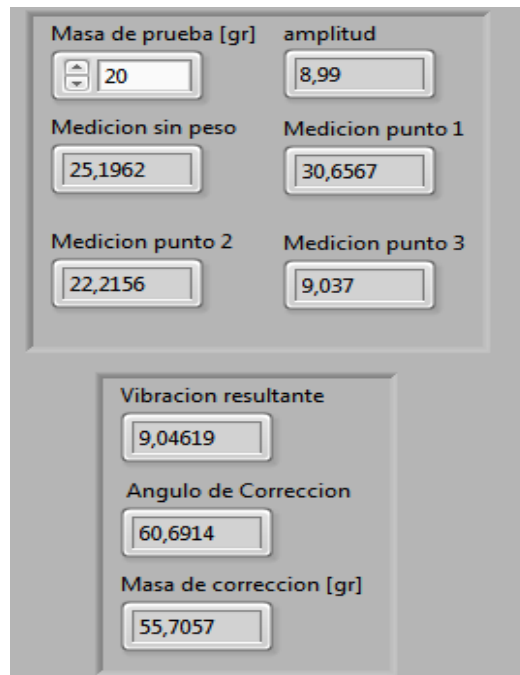
Siguiendo los pasos de montaje como se especifica en la sección 4.1, se prepara el rotor y a montar sobre las bases flotantes. Debido al peso que tiene este rotor fue necesario un tecla para el montaje del mismo como se muestra en la Figura 4.11. Los resultados del balanceo se muestran en la Figura 4.12.

Figura 4.11: Rotor de 75 hp señalado en sentido horario



Rotor ajustado adecuadamente (Collaguazo Edison, 2019)

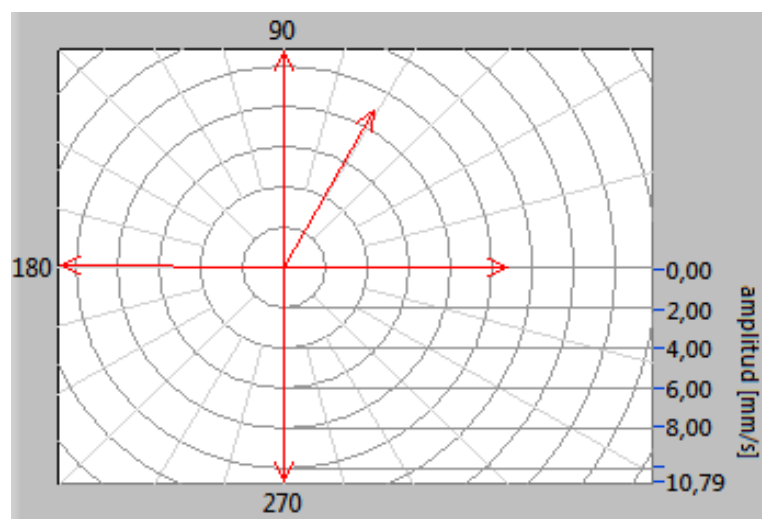
Figura 4.12: Resultados de las corridas de prueba sobre rotor de 75 hp



Resultados de la medición sobre el rotor de 75 Hp (Cárdenas Frank , 2019)

En este rotor a diferencia que el ensayo del ejemplo 1, posee 9 alabes sobre los cuales es posible colocar las masas de corrección lo que quiere decir que la separación de estos se encuentra a  $40^\circ$ . La Figura 4.13 muestra el punto en el cual el rotor se encuentra desbalanceado.

Figura 4.13 Diagrama polar obtenido del análisis

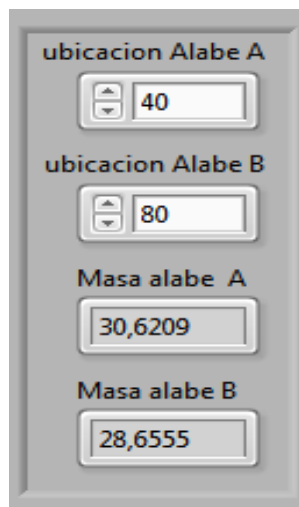


Vector de posicionamiento para corrección del desbalance (Cárdenas Frank , 2019)

### 4.5.2 Resultados

Teniendo en cuenta que el ángulo de corrección resulto en una posición de  $60^\circ$ , quiere decir que estar ubicado entre los alabes a  $40^\circ$  y  $80^\circ$ , por lo tanto, sería necesario calcular dos masas de corrección que se ubique sobre estos alabes, los cuales se encuentran marcados con los números 2 y 3, dando los resultados mostrados en la Figura 4.14

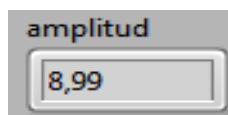
Figura 4.14 masas de corrección sobre los alabes 2 y 3



masas de corrección ubicadas sobre los alabes de  $40^\circ$  y  $80^\circ$  grados respectivamente (Collaguazo Edison, 2019)

Al medir la amplitud con las masas de prueba ubicadas en sus alabes respectivos se obtuvo el valor de amplitud mostrado en la Figura 4.15

Figura 4.15 Resultados de amplitud del rotor balanceado



Resultado de la vibración después de la corrección (Collaguazo Edison, 2019)

Claramente se aprecia que el valor de amplitud sin las masas de corrección en comparativa con el valor de amplitud una vez ubicadas las masas de corrección generó un resultado significativamente menor al valor original. Como se trata de un rotor grande este ya se puede considerar un valor aceptable, debido a que por el tamaño del rotor este presentará mayor cantidad de vibraciones que un rotor considerablemente más pequeño.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Se completó el desarrollo de la máquina balanceadora electrónica, para lo cual se implementó un HMI con el software Labview y una DAQ Arduino. Para obtener las señales de los sensores producidas por las vibraciones del rotor y observar los puntos de desbalance donde se genera la mayor parte de fuerzas de descompensación y así corregir las vibraciones producidas en rotores.

Mediante una exploración a profundidad del proceso de análisis de vibraciones, se determinó con exactitud los elementos constituyentes de la estructura mecánica para realizar planos estructurales que sirvieron como punto de partida para la implementación de la misma.

Debido a la resistencia y maleabilidad que presenta el duraluminio, todas las partes móviles de la maquina balanceadora fueron fabricadas con este material y las partes estáticas con acero de alta resistencia, permitiendo así una buena rigidez y resistencia ya que al ser probada con rotores de varios tamaños y pesos elevados la maquina no presento deformación alguna.

La tarjeta de control desarrollada es capaz de obtener las señales de velocidad y aceleración provenientes del tacómetro y acelerómetro respectivamente y mediante el uso de técnicas de tratamiento digital de señales, se obtienen señales medibles y entendibles para su posterior análisis siendo así posible generar un resultado para determinar el punto donde se crea el desbalance y corregirlo.

El HMI implementado permite ingresar en las pestañas que brindan la información de la maquina sometida al análisis, así como el estado de las señales obtenidas por los sensores que proporcionan formas de ondas entendibles que permiten al operario realizar el análisis del rotor y determinar el punto específico del desbalance del rotor para su respectiva corrección. Los resultados del análisis se muestran en pantalla lo que permite generar un reporte final.



Se sometió a las pruebas de balanceo, rotores que previamente fueron balanceados manualmente. Estos rotores todavía presentaban vibraciones importantes oscilando entre valores superiores a 25 mm/s en rotores de moderada potencia y 9 mm/s en rotores de baja potencia, para lo cual se aplicó el método de balanceo, consiguiendo corregir en gran manera la cantidad de vibraciones que estos presentaban, ahora oscilando en valores por debajo de 9 mm/s en rotores grandes y 1 mm/s en rotores pequeños, razón por la cual la empresa obtendrá un beneficio al brindar un servicio de mejor calidad en un menor tiempo.

## **5.2 Recomendaciones**

Debido a la gran interferencia electromagnética que el motor eléctrico genera, esta repercute directamente sobre la tarjeta de adquisición de datos en algunos casos llegando a congelar completamente la interfaz de usuario. Por esta razón la tarjeta de adquisición de datos podría ser mejorada con el uso de opto acopladores en sus entradas que proporcionen aislamiento a la señal y minimizar los efectos de las causas electromagnéticas.

Cuando se balancea un rotor de gran tamaño, el motor eléctrico que se encuentra en la base de la máquina balanceadora el cual impulsa a dicho rotor soporta más carga, por tanto, la corriente en el motor aumentara afectando directamente al variador de frecuencia que comanda el motor. Por tanto, para detener el rotor eléctrico hay que hacerlo con mucha suavidad ya que, si la prueba se detiene de golpe, ocasionaría afecciones graves sobre el variador de frecuencia.

## REFERENCIAS

- A-MAQ S.A (Dirección). (2017). *Balanceo de rotores por 4 corridas sin fase*
- Brotons, X. (2004). *sistemas de control* . Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5>
- Cadena Padilla, M. V., & Chancusig Pila, C. L. (2009). *diseño y construccion de una maquina balanceadora automatica controlada por computadora de rotores electricos para la empresa electro industrial*. Obtenido de [www.espe\\_1/Downloads/balanceadora-de-rotores%20.pdf](http://www.espe_1/Downloads/balanceadora-de-rotores%20.pdf)
- De Valdevira , A. (noviembre de 2011). *motores de corriente alterna* . Obtenido de [http://platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/1eva/introduccion\\_motores\\_ca.pdf](http://platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/1eva/introduccion_motores_ca.pdf)
- ERBESSD INSTRUMENTS. (10 de abril de 2019). *erbessd instruments*. Obtenido de <https://www.erbessd-instruments.com/es/articulos/maquina-balanceadora-turbos>
- Estupiñan, E., San Martin, C., & Canales , L. (2006). Desarrollo de un instrumento virtual para el balanceo dinamico de rotores . *Ingeniare*, 146-152.
- Gerdau Corsa. (2018). *el acero HOY. eleccion de tipo de acero para estruccturaas*. mexico D.F, mexico.
- Lizazo, J., Puentes, A., & Vergara Ph.D, M. (Abril de 2018). sistema de adquisicion de datos para el analisis de desbalance en maquinas rotativas . *Revista colombiana de tecnologia avanzada* .
- Marín, P. E. (1997). *la medicion del analisis de vibraciones maquinas rotativas*. Cuba: IMM.
- Morales, M. (4 de febrero de 2017). *TeslaBem*. Recuperado el julio de 2019, de <https://teslabem.com/nivel-intermedio/fundamentos-del-protocolo-i2c-aprende/>
- Mujal Rosas, R. (2004). *motor asincrono con rotor de chapas en espiral*. cataluña . Obtenido de

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93602/04CAPITULO3b.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Orozco, F. (Dirección). (2013). *Estatica: Armaduras y metodos de nodos* [Película].

Peñaloza , g., & Uguña , J. (2017). *modelos dinamicos de maquinas de induccion saturadas*. cuenca.

powtran technology. (2018). manual de usuario, modelo Pi130.

Robles Aguilar, G. (5 de septiembre de 2011). *Maquinas electricas rotativas*. Lima, Peru.

Rosales Fernandez , J. (2012). *Motores elecricos para laindustria*. mexico.

White, G. (2010). *introduccion al analisis de vibraciones* . wobum: Azima DLI .

## ANEXOS

### Anexo 1. Código completo de calibración del sensor mpu6050 implementado en la IDE de Arduino

```
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#include "Wire.h"

// La dirección del MPU6050 puede ser 0x68 o 0x69, dependiendo
// del estado de AD0. Si no se especifica, 0x68 estará implícito
MPU6050 sensor;

// Valores RAW (sin procesar) del acelerómetro y giroscopio en los ejes x,y,z
int ax, ay, az;
int gx, gy, gz;

//Variables usadas por el filtro pasa bajos
long f_ax, f_ay, f_az;
int p_ax, p_ay, p_az;
long f_gx, f_gy, f_gz;
int p_gx, p_gy, p_gz;
int counter=0;

//Valor de los offsets
int ax_o, ay_o, az_o;
int gx_o, gy_o, gz_o;

void setup() {
  Serial.begin(57600); //Iniciando puerto serial
  Wire.begin(); //Iniciando I2C
  sensor.initialize(); //Iniciando el sensor

  if (sensor.testConnection()) Serial.println("Sensor iniciado correctamente");

  // Leer los offset los offsets anteriores
  ax_o=sensor.getAccelOffset();
  ay_o=sensor.getYAccelOffset();
  az_o=sensor.getZAccelOffset();
  gx_o=sensor.getXGyroOffset();
  gy_o=sensor.getYGyroOffset();
  gz_o=sensor.getZGyroOffset();

  Serial.println("Offsets:");
  Serial.print(ax_o); Serial.print("\t");
  Serial.print(ay_o); Serial.print("\t");
  Serial.print(az_o); Serial.print("\t");
  Serial.print(gx_o); Serial.print("\t");
  Serial.print(gy_o); Serial.print("\t");
  Serial.print(gz_o); Serial.println("\t");
}
```

```

Serial.println("\n\nEnvie cualquier caracter para empezar la calibracion\n\n");
// Espera un caracter para empezar a calibrar
while (true){if (Serial.available()) break;}
Serial.println("Calibrando, no mover IMU");
}

void loop() {
  // Leer las aceleraciones y velocidades angulares
  sensor.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
  sensor.getRotation(&gx, &gy, &gz);

  // Filtrar las lecturas
  f_ax = f_ax-(f_ax>>5)+ax;
  p_ax = f_ax>>5;

  f_ay = f_ay-(f_ay>>5)+ay;
  p_ay = f_ay>>5;

  f_az = f_az-(f_az>>5)+az;
  p_az = f_az>>5;

  f_gx = f_gx-(f_gx>>3)+gx;
  p_gx = f_gx>>3;

  f_gy = f_gy-(f_gy>>3)+gy;
  p_gy = f_gy>>3;

  f_gz = f_gz-(f_gz>>3)+gz;
  p_gz = f_gz>>3;

  //Cada 100 lecturas corregir el offset
  if (counter==100){
    //Mostrar las lecturas separadas por un [tab]
    Serial.print("promedio:"); Serial.print("\t");
    Serial.print(p_ax); Serial.print("\t");
    Serial.print(p_ay); Serial.print("\t");
    Serial.print(p_az); Serial.print("\t");
    Serial.print(p_gx); Serial.print("\t");
    Serial.print(p_gy); Serial.print("\t");
    Serial.println(p_gz);
  }
}

```

```

//Calibrar el acelerometro a 1g en el eje z (ajustar el offset)
if (p_ax>0) ax_o--;
else {ax_o++;}
if (p_ay>0) ay_o--;
else {ay_o++;}
if (p_az-16384>0) az_o--;
else {az_o++;}

sensor.setXAccelOffset(ax_o);
sensor.setYAccelOffset(ay_o);
sensor.setZAccelOffset(az_o);

//Calibrar el giroscopio a 0º/s en todos los ejes (ajustar el offset)
if (p_gx>0) gx_o--;
else {gx_o++;}
if (p_gy>0) gy_o--;
else {gy_o++;}
if (p_gz>0) gz_o--;
else {gz_o++;}

sensor.setXGyroOffset(gx_o);
sensor.setYGyroOffset(gy_o);
sensor.setZGyroOffset(gz_o);

counter=0;
}
counter++;
}

```

## Anexo 2. Código completo para implementar el tacómetro digital mediante el sensor E18 implementado en el software de mikroC.

```

//importar libreria para manejo lcd 16x2

int pulsos=0,rpm,rpm1;
int valor=0,Helices=1,seguroB=0;
char conversion[8],HeliceT[7];
char pwm_pulse[7];
char text1[]="RPM = ";
char text2[]="PWM = ";

void main() {

lcd_init();
PWM1_Start();
lcd_cmd(_LCD_cursor_off);
LCD_CMD(_LCD_CLEAR);
PWM1_Init(5000);

PORTC.RC0=0; //Agago el pin RB6
TRISC.RC0=1; //declaro como salida el pin RB6
PORTC.RC1=0; //Igual pero con otro pin
TRISC.RC1=1;
PWM1_Set_Duty(0);

while(1){

if(valor==0){

```

```

    IntToStr(Helices,HeliceT); //CONVIERTO MIVARIABLE ENTERA A UNA CADENA DE TEXTO Y
    PODER MOSTRALA EN EL LCD
    LCD_out(1,1,"Cantidad de"); //MENSAJE EN LA POSICION 1,1 DEL LCD
    LCD_out(2,1,"Puntos ="); //MENSAJE EN LA POSICION 2,1 DEL LCD
    LCD_OUT(2,9,HeliceT); //MENSAJE EN LA POSICION 2,9 para ver las Helices seleccionadas
    if(PORTC.RC1 == 1){ //Si se aprieta este boton el valor cambia a 1 y pasaria a la funcion de else
        valor = 1;
        LCD_CMD(_LCD_CLEAR); //Limpio el LCD
    }
    if(PORTC.RC0 == 1){ //Si se presiona el boton se activa el seguro del boton
        seguroB=1;
    }
    if(seguroB == 1 && PORTC.RC0 == 0){ //Si se suelta el boton y el seguro es 1 aumenta las helices
        seguroB=0;
        Helices++;
        if(helices>8){ //condicion de maximo 5 Helices de lo contrario se reinicia (se puede
cambiar a mas)
            Helices=1;
        }
    }
}
else{

TMR0=0;
delay_ms(1000);
//lcd_cmd(_lcd_clear);
pulsos=TMR0;
rpm=(pulsos*60)/Helices;
intToStr(rpm,conversion);

lcd_out(1,1,"Vel [RPM] =");
lcd_out(1,10,conversion);

// cantidad de pulsos

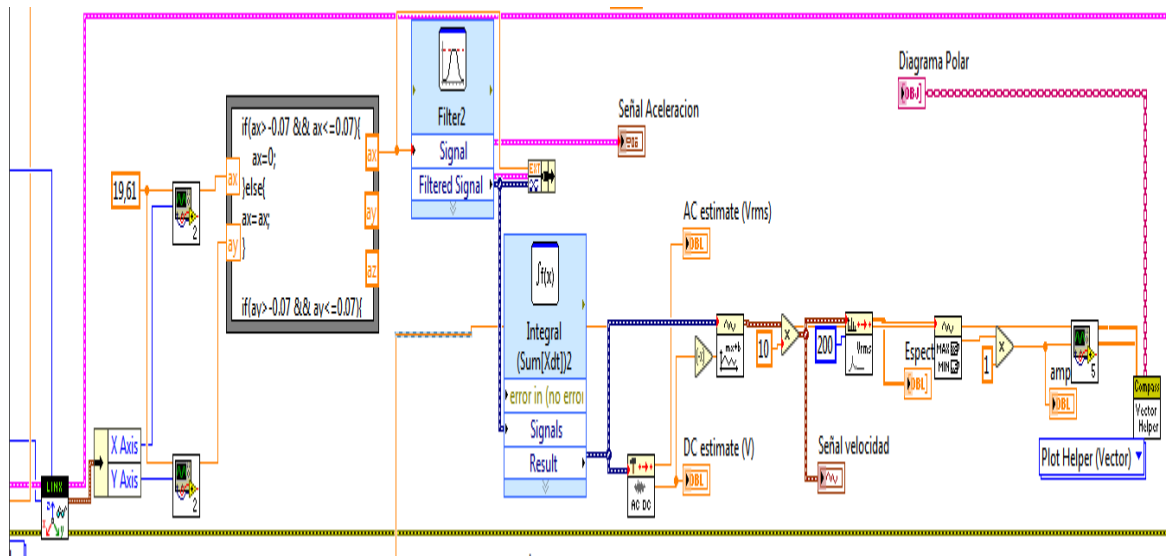
rpm1=(pulsos*255)/60;

PWM1_Set_Duty(rpm1); //salida del pwm
intToStr(pulsos,pwm_pulse);
lcd_out(2,1,"Pulsos");
lcd_out(2,10,pwm_pulse);

}
}
}

```

**Anexo 3.** Fragmento del código implementado en Labview para el procesamiento de las señales de aceleración.



**Anexo 4.** Fragmento del código implementado en Labview para la generación del reporte de balanceo en Word.

